



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut
Maaehituse ja veemajanduse õppetool

Allan Antsmäe

**EKOPANELY PÕHUPLAATIDE MEHAANILISTE JA
FÜÜSIKALISTE OMADUSTE UURIMINE**
STUDY OF MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF
EKOPANELY STRAW BOARDS

Magistritöö
Maaehituse õppekava

Juhendajad: nooremteadur Martti-Jaan Miljan, MSc
lektor Vello Pallav MSc

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Allan Antsmäe		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Ekopanely põhuplaatide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste uurimine			
Lehekülgi: 137	Jooniseid: 63	Tabeleid: 6	Lisaid: 11
Osakond / Õppetool: ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Juhendaja(d):		Maaehituse ja veemajanduse õppetool T220 nooremteadur Martti-Jaan Miljan, lektor Vello Pallav	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu, 2019	
<p>Käesolevas magistritöös uuriti Tšehhi ettevõtte Ekopanely poolt valmistatud põhuplaatide mehaanilisi- ja füüsikalisi omadusi, eesmärgiga suurendada põhuplaatide kasutus võimalusi ehituses. Magistritöö käigus uuriti põhuplaatide painde- ja survetugevust, põhuplaadi ja puit posti ühelõikelise kruviliite tugevust, põhuplaatide ja puitsõrestik postide komposiitkütumist vertikaalsele survele. Parema võrdluse eesmärgil tehti võrdlevad katsed OSB plaatide ja sõrestikpostidega. Lisaks mõõdeti põhuplaatide soojuserijuhtivust.</p> <p>Surve-, painde- ja kruviliite katsekehad lõigati välja 12 erinevast põhuplaadist. Iga katse seeria jaoks valmistati 24 katsekeha. Soojuserijuhtivuse katsekehad võeti viiest erinevast põhuplaadist. Põhuplaat-puitkarkass seinapaneelidega viidi läbi 5 survekandevõime katset ja OSB plaat puitkarkass paneelidega 3 survekandevõime katset. Katsed teostati Eesti Maaülikooli puidu- ja ehituskonstruksioonide laborites.</p> <p>Surve- ja paindekatsetele teostati stabiilsusanalüüs, lisaks arvutati paindekatsete käigus paindelastsumoodulid. Seinapaneelide survekandevõime katsete tulemusena saab järeldada, et põhuplaadi kasutamine puitpostide jäigastava materjalina suurendas olulisel määral puitpostide nõtketugevust. Kolme katse keskmisena suurenes puitposti kandevõime tänu põhuplaadile 4,6 korda. Lisaks uuriti põhuplaadi ja puitkarkassi ühelõikelise kruviliite tugevust. Katsete tulemusena selgus, et kruviliite löike kandevõime on piki plaati 26 % suurem kui risti plaati.</p> <p>Põhuplaatide katsekehadele määrati soojuserijuhtivuse näitajad. Katsete mõõtmise tulemused erinesid võrreldes tehase andmetega 19 %. Viie katse keskmiseks tulemuseks (10° C juures) saadi 0,118 W/(m·K).</p> <p>Märksõnad: põhuplaat-puit komposiitkonstruktsioon, survekandevõime, paindetugevus, survetugevus, soojuserijuhtivus</p>			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Allan Antsmäe		Speciality: Civil Engineering	
Title: Study of mechanical and physical properties of Ekopanely straw boards			
Pages: 137	Figures: 63	Tables: 6	Appendixes: 11
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERC S) code:		T220	
Supervisors:		Martti-Jaan Miljan, Vello Pallav	
Place and date:		Tartu, 2019	
<p>In this master's thesis were studied the mechanical and physical properties of the straw panels produced by the Czech company Ekopanely. The purpose of this thesis is to increase the use of straw panels in construction. The flexural and compressive strengths of straw panels were examined, as well as the composite behavior of straw panels and wooden frame under vertical pressure. For better comparison, tests were also performed on OSB and half-timbered panels. The strength of the straw panel and wooden frame one-piece connector screw was measured as well as, the thermal conductivity of the panel.</p> <p>Pressure, compressive and screw test pieces were cut out from 12 different straw panels. 24 test pieces were prepared for each round of tests. For thermal conductivity tests, pieces were cut out of 5 straw panels. With straw and wooden panels 5 pressure load tests were performed and with OSB and wooden panels – 3 tests. The tests were carried out in wood laboratory and in the laboratory of building materials at the Estonian University of Life Sciences.</p> <p>For the pressure and flexural tests, stability analysis was performed, as well as, the flexural modulus was calculated. As a result of the bearing capacity tests on wall panels, it can be concluded that the use of a straw panel as a stiffening material for frame wall has greatly increased its stiffness. As the average of three tests, the load capacity of the frame wall was increased in 4.6 times, thanks to the straw panel. In addition, the strength of the straw panel and wooden frame one-piece connector screw was measured. The tests have revealed that the load capacity of the screw is 26% higher in longitudinal panel, than in perpendicular.</p> <p>Thermal conductivity parameters of the panels were also revealed during the testing. Test results differed by 19%, compared to the data provided by factory. The average result (10° C) for test was 0.118 W/(m·K).</p>			
Keywords: straw board-wood composite construction, bending strength, compression strength, thermal conductivity			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. PÕHU KASUTAMINE EHITUSES	8
1.1. Põhu kasutamise ajalugu ehituses	8
1.2. Põhk ehitusmaterjalina	10
1.2.1. Põhust ehitamise keskkonnasäästlikus	10
1.2.2. Põhumajade tulekindlus	11
1.2.3. Põhumajade heliisolatsiooniomadused	12
1.2.4. Näriliste oht	12
1.3. Ülevaade põhuplaatidest	13
1.3.1. Põhuplaadist üldiselt ja erinevatest kasutusvõimalustest	13
1.3.2. Ajalugu	14
1.3.3. Tootmise tehnoloogia	14
2. KATSETE TEOSTAMISE METOODIKA	17
2.1. Põhuplaatide painde- ja survekatsed	17
2.1.1. Katsekehade valmistamine	17
2.1.2. Mõõte- ja katseseadmed	18
2.1.3. Paindetugevuse ja elastsusmooduli määramine	20
2.1.4. Survetugevuse ja surve elastsusmooduli määramine	22
2.2. Kruvi löike kandevõime määramise metoodika	23
2.2.1. Katsete läbiviimine	25
2.3. Põhu- ja OSB- plaatidest paneelide katsetamise metoodika vertikaal koormusel puitkarkassil	26
2.3.1. Puitpostide nõtkekatse kirjeldus	27
2.3.2. Põhu- ja OSB plaatide katsekehade kirjeldus ja katsetamise metoodika	29
2.4. Statistiline andmetöötlus	36
3. KATSE TULEMUSED JA ANALÜÜS	37
3.1. Paindekatsed	37
3.1.1. Paindekatsed piki plaati lõigatud katsekehadega	37
3.1.2. Paindekatsed risti plaati lõigatud katsekehadega	39
3.2. Survekatsed	41
3.2.1. Survekatsed piki plaati lõigatud katsekehadega	42
3.2.2. Survekatsed ristiplaati lõigatud katsekehadega	44
3.3. Raamide ja seinapaneeli postide katse tulemused ja analüüs	46
3.3.1. Puitpostide nõtkekatset	46
3.3.2. Horisontaalsete prussidega põhupaneeli postide katsete analüüs	47
3.3.3. Ilma horisontaalsete prussidega põhupaneeli postide katsete analüüs	49
3.3.4. OSB plaatidega paneeli postide katsete analüüs	51
3.4. OSB- ja põhupaneeli postide siirete omavaheline võrdlus	53
3.4.1. OSB- ja põhupaneeli postide horisontaalsiirete (x-telje sihis) võrdlus	53
3.4.2. OSB- ja põhupaneeli postide vertikaalsiirete võrdlus	55
3.4.3. OSB- ja põhupaneeli postide z-telje suunaliste siirete võrdlus	56
3.5. OSB-, põhuplaadi ja puitpostide komposiitkäitumise analüüs	57
3.6. Ühelõikelise kruvi liite kandevõime analüüs	58
3.6.1. Ühelõikelise kruvi liite analüüs risti plaati lõigatud katsekehadega	58

3.6.2. Ühelõikelise kruvi liite katse analüüs piki plaati lõigatud katsekehade	61
4. PÕHUPLAADI SOOJUSERIJUHTIVUSE MÄÄRAMINE	64
4.1. Katsekehad	64
4.2. Katseseadmed	65
4.3. Katsemetoodika	68
4.4. Katsete analüüs	71
KOKKUVÕTE	74
KASUTATUD KIRJANDUS	78
SUMMARY	81
LISAD	85
Lisa 1. Katsekehade lõikeplaan	86
Lisa 2. Põhu- ja OSB- seinapaneelide joonised	90
Lisa 3. Painde katsekehade mõõdud, katsetulemuste andmed ja katsekehade purunemise pildid	93
Lisa 4. Surve katsekehade mõõdud, katsetulemuste andmed ja katsekehade purunemise pildid	99
Lisa 5. Puitpostide koormused lubatud maksimaalsete nõtkete juures, ristlõike mõõdud ja niiskussisaldused	105
Lisa 6. Raami nõtkekatsetel rakendatud vertikaalsed koormused	107
Lisa 7. Põhuplaatidega seinapaneelide katse tulemused	108
Lisa 8. OSB plaatidega seinapaneelide katsete tulemused	109
Lisa 9. Põhu- ja OSB paneelide katsetuste pildid	110
Lisa 10. Kruvi kinnituse katsekehade mõõdud, katsetulemuste andmed ja katsekehade purunemise pildid	124
Lisa 11. Soojusjuhtivuse katsete graafikud 58 mm põhuplaadi katsekeha mõõtmiste kohta	131

SISSEJUHATUS

Käesoleval ajal pööratakse üha rohkem tähelepanu ökoloogilisele jalajäljele. Järjest rohkem hakatakse aru saama ümbritseva keskkonna puhtuse olulisusest. Inimesed ei taha süüa säilitusaineid sisaldavat toitu ja elada toksilises keskkonnas. Sellest tulenevalt on ökoloogiliste toodete järele üha suurem nõudlus.

Tänapäeva ehitustegevus mõjutab oluliselt ümbritsevat keskkonda ja jätab üha suurema jälje loodusesse. Sellepärast on hakatud ehitusmaterjalide tootmise sektoris üha rohkem otsima võimalusi loodussäästvate ehitusmaterjalide kasutamiseks, mis on alternatiiviks tööstuslikult toodetud ehitusmaterjalidele. Tänu energiatõhususe nõuete karmistumisele suureneb vajadus energiaefektiivsete hoonete järele. Üheks lahenduseks on kasutada looduslikke ehitusmaterjale energiatõhusate hoonete ehituses, saades seeläbi väiksema CO_2 emissiooni mõju keskkonnale. (Alcorn, 2010)

Põhk on ülejääk, mis jääb järgi peale teravilja (nisu, riis, oder, kaer ja rukkis) koristamist. (Wilson, 1995)

Põhk on laialt levinud kõrvalprodukt põllumajanduses, mis on kiirelt taastuv põllumajandus saadus võrreldes näiteks metsaga, mille uuendamiseks kulub aastakümneid, või kipsplaadi ja betooniga, mida ei saa taaskasutada efektiivselt. (Straw Resource Limited, 2019)

Samuti on väga tähtis taimede omadus valguse ja klorofüll (leherohelise) abil omastada õhust süsihappegaasi (CO_2). Klorofüll muundab fotosünteesis valgusenergia organiliste ainete keemiliseks energiaks, millega kaasneb hapniku ja formaldehüüdi tootmine. Hapnik eraldub õhku, formaldehüüd töödeldakse ümber taimede kättesaadavaks toitaineiks (Saarman, 2006). Sellest tulenevalt on põhu kasutamine ehitusmaterjalina väga keskkonnasäästlik ja jätab loodusele väiksema ökoloogilise jalajälje, võrreldes tööstuslikult toodetud ehitusmaterjalidega.

Sõna põhk tuletab ilmselt paljudele meelde muinasjuttu kolmest põrsakesest, kus hunt puhub ümber põrsaste põhust ehitatud maja. Tegelikult on aga hoopis midagi muud ja fakt on see, et põhku kasutatakse ehituses üha suuremal määral. Käesolev töö keskendubki põhu omaduste uurimisele läbi katsete.

Magistritöö peamiseks eesmärgiks on uurida, kas Tšehhi ettevõtte Ekopanely poolt toodetav põhuplaat suurendab puitkarkassi seina kandevõimet ja kas see on võrreldav OSB plaadi poolt pakutavate omadustega. Lisaks uuritakse puitposti ja plaadi vahelise kruvi kinnituse (ühelõikelise liite) tugevust, kus vaadeldakse mõjutavat jõudu plaadis oleva põhule piki- ja ristikuidu ning võrreldakse seda plaadi tihedusega. Mõõdetakse põhuplaadi painde- ja survetugevus ning võrreldakse andmeid varasemate katsetulemustega. Ehitusfüüsikalistest parameetritest määratakse soojuserijuhtivus ja võrreldakse tulemust tehase andmetega ning teiste sarnaste omadustega, looduslike ehitusmaterjalidega.

Käesolevad uuringud võiks olla abiks põhuplaatide kasutusele ehituses. Ühtlasi propageerida põhuplaadi kui loodusliku – ja taastuva ehitusmaterjali kasutust, ning pöörata tähelepanu säästvale ja keskkonnasõbralikule ehitusele.

Töö on üles ehitatud nelja osalisena. Esimese peatükis antaks ülevaade põhu kasutusest ehitusmaterjalina üldiselt ja kasutus ajaloos. Tutvustatakse põhuplaatide kasutus võimalusi, tootmisprotsessi ja antakse ülevaade plaadi valmistamise ajaloost. Töö teises peatükis selgitatakse valitud katsete metoodikaid, tutvustatakse katseseadmeid ning katsekehade valmistamist. Kolmandas peatükis analüüsitakse saadud katsete tulemusi. Võrreldakse erinevate katsekehade maksimaalseid koormuseid ja deformatsioone. Neljandas peatükis uuritakse põhuplaadi soojuserijuhtivus omadusi ja võrreldakse saadud tulemusi tehase poolt antud väärtusega ning teiste looduslike ehitusmaterjalide soojuserijuhtivustega.

1. PÕHU KASUTAMINE EHTUSES

1.1. Põhu kasutamise ajalugu ehituses

Põhku on inimesed erinevates ehitusmeetodites kasutanud ehitusmaterjalina alates ajast kui hakati ehitama endale eluasemeid, mis oleksid mugavad, turvalised ja vastupidavad erinevates kliimades. Enamasti kasutati põhku saviga segatult näiteks seinte ehituses. (Steen A. S., 1994)

Põhku kui konstruktsiooni ühte põhielementi hakati kasutama majade ehituses Nebraskal Ameerika Ühendriikides 19 saj lõpus, kui leiutati põhupakkimise masinad. Valged asunikud kasvasid Nebraska tasandikel teravilja ja kuna seal puudus ehitamiseks piisavalt tavapärast ehitusmaterjali, kive ja puitu, tuli kasutusele võtta põhk, mis oli ülejääk teraviljakasvatusest. Põhupakid laoti üksteise peale sarnaselt kivimüüri ladumise tehnikaga, põhupakid moodustasid sedasi kandva seinakonstruktsiooni. Selline ehitusviis on tuntud tänapäeval kui Nebraska ehk kandvate põhupakkidega ehitusviis. Asunikud avastasid, et põhupakkidest seinad hoidsid majad talvel soojad ja pakkusid jahedust suvel, lisaks omasid seinad helisummutavat omadust vinguva tuule eest. Selline positiivne kogemus innustas põhku elumajade ehituses kasutama ka edaspidi. (Amazon Nails, 2001)

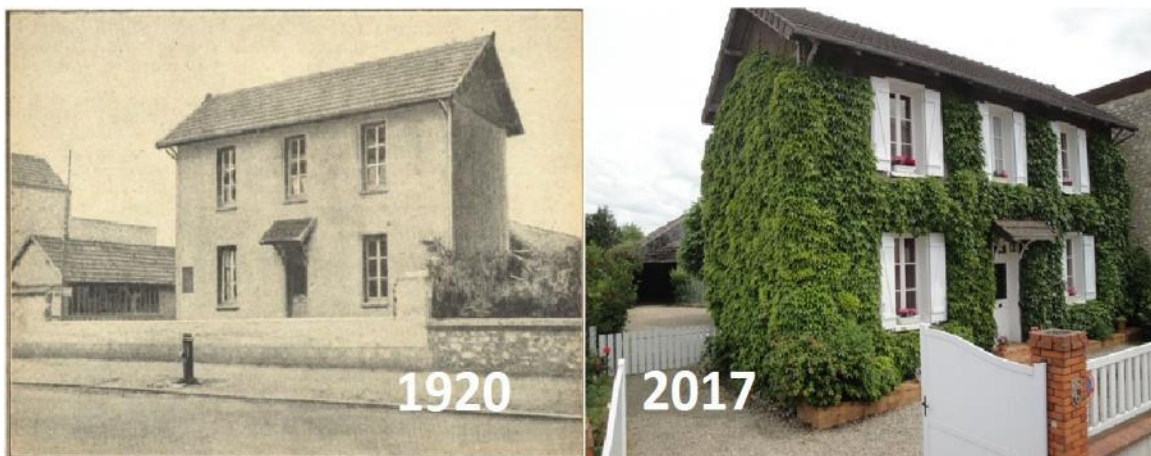


Joonis 1. Üks vanemaid säilinud põhuhooneid USA-s Pilgrim Holiness kirik, ehitatud rukki põhu pakkidest 1928 aastal (npgallery.nps.gov, 2019).

Aktiivne põhumajade ehitus kestis 1940ndate aastateni kuni Teine maailmasõda ja tsemendi populaarsuse kasv selle põhimõtteliselt välja suretas. 1970. aastate lõpus avastasid ehitusentusiastid eesotsas Judy Knoxi ja Matts Myrhmaniga mõned varajastest ehitatud põhupakkidest majad ja taaselustasid väljasurnud ehitustehnoloogiaid ning jagasid seda keskkonnast hoolivale ja põhuehitusest huvitatud kuulajaskonnaga. Lisaks asutati Arizonas ajakiri „The Last Straw“ mis andis informatsiooni põhuehituse ja ehitiste kohta kõigile huvilistele. (Amazon Nails, 2001)

Sammuti hakati põhu omadusi ja sobivust ehitusmaterjalina uurima teaduslikult, selle tulemusena töötati 1990ndate alguses Arizonas ja New Mexicos välja ehitusnormid nii Nebraska kui karkassiga ehitusviisile. See tähtsustas veelgi põhupakke kui seaduslikku ehitusmaterjali ja lihtsustas ehituslubade väljaandmist ja suurendas põhust ehitiste levikut.

USA-s on üks vanemaid säilinud põhuhooneid Pilgrim Holiness kirik, mis on ehitatud rukki põhu pakkidest 1928 aastal (Joonis 1). Euroopas on teadaolev säilinud vanim põhumaja Prantsusmaal Montargis. Ehitatud insener Emile Feuillet poolt 1920 aastal ja on kasutusel tänapäevani (Joonis 2). (The Feuillet house, 2019)



Joonis 2. Euroopa teadolevalt vanim puitkarkassil ja põhupakkidest täidisega hoone (www.helloasso.com, 2019).

Eestisse ehitati teadaolevalt esimene põhumaja Piritale 2006 aastal. (Kirsipuu, 2006) 2011 aasta seisuga oli Eestis ehitatud 40 põhumaja, millest osad küll suvemajad ja saunad (Jõgeda, 2011). Kodukuubis OÜ poolt on tänaseks Eestis ehitatud põhuplaat puitkarkassil kaks elumaja ja hulk suvemaju ja saunasid.

1.2. Põhk ehitusmaterjalina

Põhumaja tekitab tavaliselt eelarvamusi, sest põhk on oma tavaolekus väga tundlik niiskusele ja läheb kergelt hallitama, väga tuleohtlik ning on närilistele meelis elupaigaks. Tavaliselt on sellised argumendid piisavad, et põhk kui ehitusmaterjal kõrvale jätta ja valida mõni traditsioonilisem ehitusmaterjal. Aga kui asjasse süveneda ja põhu omadusi kokkupressitud kujul vaadata, kasutada õigeid ehitusmeetodeid, on põhust maja sama soojapidav, turvaline ja vastupidav kui mistahes muust ehitusmaterjalist ehitatud maja.

1.2.1. Põhust ehitamise keskkonnasäästlikus

Rahvaarv maailmas kasvab pidevalt ja sellega kaasneb ka nõudlus uute hoonete järele. Arenenud maades on ehitussektor üks kõige suuremaid energiaressursi kasutajatest. Keskmiselt arvatakse, et ehitussektoris on energia kasutuse tõus aastas 1,5 % ja seda järgmised kakskümmend aastat. (Pérez-Lombard, 2008)

Sellest tulenevalt karmistatakse pidevalt nõudeid hoonete energiatarbimisele ja kehtestatakse määruseid, mis nõuavad energiasäästlike hoonete ehitamist. Kuni tänaseni on ehitatud hooneid mille kasutuskulud on oluliselt suuremad kui ehituskulud, siis nüüd hakatakse üha rohkem tähelepanu pöörama energiatõhusate hoonete ehitamisele, samas ei tähenda see alati keskkonna säästu, sest ehitusmaterjalide tootmisele on kulutatud liiga palju energiat. (Sartori, 2006) Samas on energiatõhus hoone võimalik ehitada taastuvatest materjalidest, millest on eelkõige kasu keskkonnal. (Alcorn, 2010)

Põhku on ehituses eriti kasulik kasutada piirkondades, kus põhk on jääkprodukt. Talunike seisukohalt laguneb põhk aeglaselt ja seda ei saa kasutada loomasöödana põhu madala toiteväärtuse tõttu, seetõttu põletatakse seda maailmas suurtes kogustes. Põletusprotsessi käigus vabaneb suures koguses süsinikdioksiidi ja väikseid tahkeid osakesi. See põhjustab kasvuhoonegaaside paiskamist atmosfääri ja õhukvaliteedi langust. (Steen A. S., 1994)

Kui kasutada põhku põletamise asemel hoonete ehitamisel, saaks vähendada CO₂ kogust võrreldes tavalise hoone elutsükli hinnangus ligikaudu 30 % aastas. (Alcorn, 2010) Lisaks saaksid põhumajad vähendada metsade raie koormust piirkondades kus metsa on vähe ja taastumise protsess aeglane. Kasutades sellistes piirkondades põhku ehituseks, vähendaks see negatiivset mõju oluliselt kohalikule loodusele (Steen A. S., 1994)

Sellistes piirkondades tekib põhku nagu nii iga-aastaselt, siis ei peaks seal eraldi energiat ja teisi loodusressursse kulutama. Kui võrrelda põhu tootmiseks kuluvat energiat tööstuslikult toodetud ehitusmaterjalide tootmiseks vajaliku energiaga, siis on see kordades väiksem. Ühe tonni põhu tootmiseks kulub 33 kWh energiat (Steen A. S., 1994), sama koguse betooni tootmiseks kulub 321 kWh (Guidetti, 2017). Siit saab järeldada, et põhk on kordi vähem energiamahukam ehitusmaterjal. Eelnevale võrdlusele lisaks saab välja tuua, et uuritava põhuplaadi 1 m² valmistamiseks kulub ligikaudu 2,5 kWh energiat. (Ekopanely, 2018) See tähendab, et ühe tonni plaadi tootmiseks kulub 113,6 kWh energiat, mis on ligikaudu kolm korda vähem kui betooni tootmisel.

1.2.2. Põhumajade tulekindlus

Ehitise kandetarindite ja konstruktsioonide nõutav tulepüsivus sõltub ehitise otstarbest, tuletõkkesektsiooni pindalast ja ehitise või selle osa põlemiskoormusest. Nõutav tulepüsivust väljendatakse minutites – 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 või 240 minutit. Tulepüsivus minutites näitab ehitise konstruktsioonivõimet säilitada ettenähtud terviklikkus ning kande- ja isolatsioonivõime. (Riigi Teataja, 2015)

Põhk tundub esmapilgul väga tuleohtlik materjal ja ta ongi seda, lahtisel kujul. Kokkusurutud põhk on aga tihe ja ei sütti kergelt. Põhjus peitub selles, et kokkupressitud põhuosakeste vahelised õhuvahed muutuvad nii väikeseks, et materjal enam lahtise leegiga iseseisvalt ei põle, kuna puudub hapniku juurdepääs. Näiteks isegi kui põhupakkidest tehtud seinakrohvikihit mõraneb ja leegid pääsevad põhuni, siis söestub vaid esimene kiht ja edasiseks põlenguks pole piisavalt hapniku. Austrias läbiviidud uuringute tulemusena saadi krohvitud mittekandava põhuseina tulekindluseks, mille tihedus oli 120 kg/m³, 90 minutit. (Minke, 2005) Sama kehtib ka käesolevas töös uuritud põhuplaadi kohta. Materjali pind süttib, kui leeklambiga seinale tuld peale lasta, kuid tuli sumbub hetkel, mil leek eemaldatakse. Ahju kütmiseks seega põhuplaat ei sobi. See on aga hea, kuna antud omadus suurendab oluliselt põhuplaadist konstruktsioonide tulepüsivust. Näiteks ühe plaadiga valmistatud sein (paksus 60 mm) saavutatakse tulepüsivus EI 30 ja kolme plaadiga valmistatud sein tulepüsivus on REI 45. Plaadile on antud tulekindlusklass E. (Kodukuubis, 2018)

1.2.3. Põhumajade heliisolatsiooniomadused

Õhu kaudu leviva heli summutamine sõltub eelkõige elemendi massist, seega mida suurema massiga on sein seda paremini see heli isoleerib. Kahelt poolt krohvitud põhuseina heli summutus omadused on paremad kui sama massiga ühest materjalist ehitatud seinal. Põhjuseks on põhu teatav vibratsioon ja omadus heli neelata. (Minke, 2005)

Austraalias ehitati helistuudio seinad 45 cm paksustest põhupakkidest. Mõõtmistulemuste järgi oli heli tugevus stuudios 114 – 117 dB ja väljaspool 62 – 71dB, seda mõõdeti sageduste vahemikus 500 – 10000 Hz, see teeb mürataseme erinevuseks 43 – 55 dB. (Minke, 2005)

Helistuudioid on ehitatud põhupakkidest lisaks veel USA-s ja Inglismaal. Eestis on Ecopanely põhuplaatidest ehitatud helistuudio „Studio89“ Tallinnas (Kodukuubis, 2018)

Põhust seinte juures saab välja tuua eelise isoleerida just madalate sageduste heli, mida teiste seinakonstruktsioonidega on raskem tagada. Selletõttu sobivad põhust majad suure liikluskooresse kohtadesse või soov rajada vaikne maja kätkestasse ümbrusesse või hoopis vastupidi kätkestas tegevus vaikes naabruskonnas. (Dalmeijer, 2005)

1.2.4. Näriliste oht

Põhk koosneb teravilja vartest ja erinevalt näiteks heinast ei sisalda see närilistele meelepärast toitu, kuna seemned on eemaldatud. Lisaks kaetakse seinad mõlemalt poolt krohvi kihiga mis takistab sammuti näriliste tungimist konstruktsioonidesse. Lisaks saab täiendavate meetmetena konstruktsioone kaitsta peenest traadist võrguga enne krohvi paigaldamist. (Steen A. B., 1994)

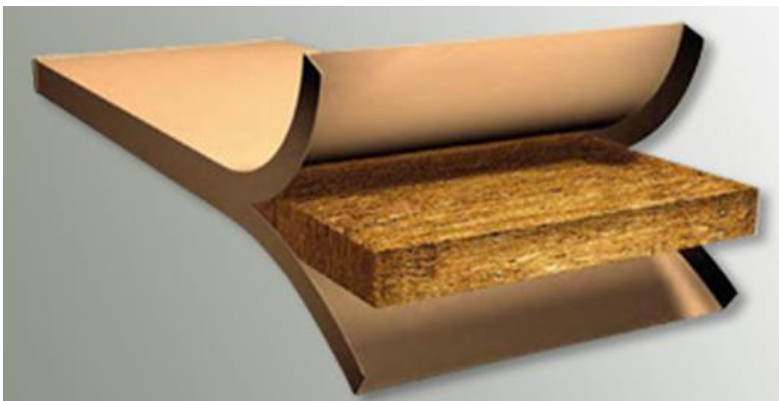
Põhuplaadi puhul on põhk termiliselt töödeldud ja seetõttu puudub närilistel huvi seda süüa, sest nad ei saa aru et tegemist on põhuga. Seega on näriliste risk sama suur kui mis tahes teise tööstuslikult valmistatud soojusmaterjalide puhul. (Kodukuubis, 2018)

1.3. Ülevaade põhuplaatidest

Käesolevas alapeatükis antakse ülevaade põhuplaatide üldistest omadustest, erinevatest kasutusvõimalustest, ajaloost ning tootmisprotsessist.

1.3.1. Põhuplaadist üldiselt ja erinevatest kasutusvõimalustest

Põhuplaat on looduslik ehituses kasutatav plaatmaterjal, mis koosneb ekstudeeritud põhust, millele on liimitud otstesse, servadesse ja mõlemale küljele taaskasutatud paber (Joonis 3). Põhuplaat tagab hoones väga hea mikrokliima (niiskuseliku ja soojusliku mugavuse) ja hea helipidavuse. Plaat on struktuurilt tihe ja tugev materjal. Seinas olevale plaadile saab mööbli-, pildid-, seadmed jms kinnitada tüübleid kasutamata, sarnaselt puidule. Toode sobib kohtadesse, kus puudub vahetu kestev kokkupuude veega. Põhuplaadist ehitatakse nii hoone sise- kui välisseinu, põrandaid, lagesid ja karniise. (Kodukuubis, 2018)



Joonis 3. Ekopanely põhuplaat. (Ekopanely, 2018)

Põhuplaat sobib samuti väga hästi vanade ja uute hoonete lisasoojustamiseks. Materjal töötab hästi koos puiduga, paigaldusel ei kasutata konstruktsioonides aurutõket, seega sein on veeauru difusioonile avatud ja saab alati välja kuivada ja tagatakse ruumide hea sisekliima. (Kodukuubis, 2018)

Tänu plaadi soojust salvestavale omadusele on võimalik tagada ruumide stabiilsem temperatuur. Seeläbi on temperatuuri kõikumised väiksemad ja see aitab ühtlasi säästa küttekuludelt. (Ekopanely, 2018)

Plaadi struktuur ja suur mass annab hea müratakistuse (58 mm plaadi müratakistus koos viimistlusega 35 dB), selle omaduse tõttu leiab plaat kasutust seinte heliisoleerimisel ja helistuudiate ehitamisel. (Kodukuubis, 2018)

Hea niiskusregulatsioon, mis tagab ruumides stabiilse õhuniiskuse ehk niiskemal perioodil imab plaat üleliigset õhuniiskust endasse ja kuivemal ajal eraldub see taas ruumi. Lisaks ei teki materjali kuivamisel õhku läbilaskvaid pragusid (Kodukuubis, 2018)

Tänu plaadi tugevale struktuurile on sellest lihtne ehitada isekandvaid seinakonstruktsioone, saades kiiresti ja kvaliteetselt viimistletava seinapinna. Lisaks on plaadiga võimalus luua omapäraseid disainilahendusi, kui papp lihvida või plaat keskelt kogu tasapinna ulatuses pooleks saagida. (Kodukuubis, 2018)

1.3.2. Ajalugu

Looduslike ehitusmaterjale on erinevas mahus kasutatud juba aastasadu. Põhku hakati hoonete ehitamiseks kasutama laialdasemalt 19.sajandi lõpus Ameerika Ühendriikides, kust see levis 20. sajandi alguses Euroopasse.

1930. aastatel prooviti mitmetel katsetel valmistada ehitusplaate kokkupressitud põhust. Selle tehnoloogia patenteeris 1935. aastal Rootsis Theodor Dieden. Pressides põhku kokku suure surve ja kuumuse all hakkas ta valmistama ehitusplaati.

1945. aastal ostis Torsten Mosesson põhuplaatide valmistamise tehnoloogia, vabriku ja õigused plaadi tootmiseks ning viis selle Inglismaale. Ta asutas vabriku Suffolkis ja lõi ettevõtte nimega Stramit (Stramitinternational, 2019).

1.3.3. Tootmise tehnoloogia

Ecopanely põhuplaatide toore saadakse nisu põhust. Põhk on põllumajanduslik jääkprodukt mis saadakse teravilja lõikamisel peale viljaterade eemaldamist.

Nisu, spelta ja rukki põhk on kõige sobivamad teraviljakultuurid, mida kasutatakse ehituses, kuna need kultuurid on käitlemisel stabiilsemad, võrreldes odra või kaera põhuga. (Minke, 2005)

Tänu suurele ränidioksiidi sisaldusele põhk laguneb väga aeglaselt. (Minke, 2005) Tabelis 1 on välja toodud teravilja põhu keemilised koostised.

Tabel 1. Erinevate teraviljade põhu keemiline koostis kuivaine protsentides (Sun, 2010)

	Vees-lahustuvained	Tselluloos	Hemi-tselluloos	Ligniin	Vaha	Tuhk
Nisu	4,7	38,6	32,6	14,1	1,7	5,9
Rukis	4,1	37,9	32,8	17,6	4,1	3
Oder	6,8	34,8	27,9	14,6	6,8	5,7
Kaer	4,6	38,5	31,7	16,8	4,6	6,1

Teravilja põhk sisaldab naturaalselt liimainet ligniini, mida saab kasutada põhu kokku liimimiseks plaadiks. (Berge, 2009)

Ligniin (raku seintes sisalduv aine, mis põhjustab rakkude puitumise) on molekulaarselt amorfne (mittekristallne, st rakuseintes asetsevad tselluloosi molekulid ei ole paraleelsed või korrapäraselt järjestatud), isotroopne (ühesugused omadused igas suunas) ja väga keerulise struktuuriga keemiline ühend. Ligniin on termoplastne aine, st külmana kõva, kuid soojenedes pehmeneb. (Saarman, 2006)

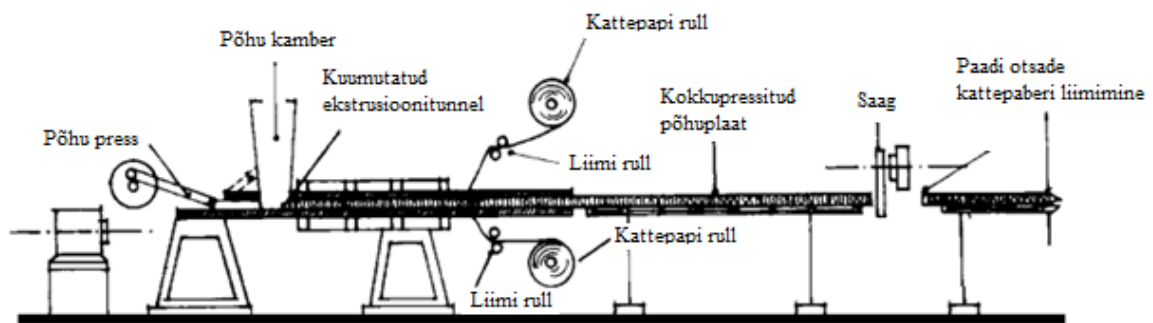
Põhuplaatide tootmisprotsess algab põhupakkide kogumisest põllult. Et vähendada põhu transpordi kulu põllult tootmistehasesse pressitakse põhk kokku suurtesse pakkides ligikaudsete mõõtudega 1,0 x 0,6 x 0,4 m.

Enne plaatide tootmisprotsessi algust kontrollitakse põhupakkide niiskussisaldust, mis peab olema vahemikus 6 – 10 %.

Põhuplaatide tootmisliini joonis on välja toodud joonisel 4 ja tootmisprotsessi etapid on kirjeldatud alljärgnevalt:

- esimene etapp – põhk puhastatakse;
- teine etapp – põhk sirgendatakse ja suunatakse pressi sisse, nii et põhu körred on orienteeritud ühes suunas;
- kolmas etapp – põhk surutakse pressi abil toodetava plaadi laiuse ja paksuse mõõduga kambrisse ja kuumutatakse 200 C° -ni;

- neljas etapp – plaat kaetakse taaskasutatud paberist valmistatud papiga neljast küljest;
- viies etapp – lõigatakse tootmisliini lõpus pressi alt väljuv ja jahtunud põhuplaadi lint etteantud mõõtu (1200 – 3000 mm pikkusteks plaatideks);
- kuues etapp – liimitakse plaadi otsad paberiga;
- valmis plaadid ladustakse virnadesse (Berge, 2009).



Joonis 4. Põhuplaatide tootmisliin. (Berge, 2009)

2. KATSETE TEOSTAMISE METOODIKA

2.1. Põhuplaatide painde- ja survekatsed

Painde- ja survekatse eesmärgiks oli leida põhuplaadi paindetugevus, painde elastsusmoodul ning survetugevus risti- ja piki plaati. Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli metsatööstuse puidulaboris.

2.1.1. Katsekehade valmistamine

Katsekehad valmistati Tšehhi Vabariigis toodetud Ekopanely põhuplaatidest. Katsekehade lõikamiseks kasutati plaate mõõtmetega 1200 mm x 2700 mm paksusega 58 mm. Plaatide valikul jälgiti, et plaatidel puudusid eelnevad defektid. Katsekehade lõikamine toimus Pärnumaa Kutsehariduskeskuse puidutöökojas. Lõikamiseks kasutati ketassaagi Mafell KSS 80 Es koos juhtlatiga (Joonis 5) ja formaatsaaga Master FP 300 (Joonis 6).



Joonis 5. Ketassaag Mafell KSS 80 ES koos juhtlatiga. **Joonis 6.** Formaatsaaga Master FP 300.

Katsekehade lõikamisel järgiti standardis EVS-EN 789:2004 määratud väljalõike plaani (vt Lisa 1)

Kõik katsekehad teibiti servadest Tesa 100 mm iseliimuva paberteibiga (Joonis 7). Teipimise vajadus tulenes põhuplaatide paigaldus juhendist, kus nõutakse kõikide lõigatud servade teipimist. (Ekopanely-brochure-EN, 2018)



Joonis 7. Katsekehade lõigatud servade teipimine Tesa iseliimuva 100 mm laiuse paberteibiga.

Kõiki katsekehi hoiti Eesti Maaülikooli metsatööstuse puidulabori kliimaruumis vastavalt standardile EVS-EN 322 temperatuuril $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ja niiskusesisalduse $65 \pm 5\%$ juures. Katsekehade kaal on katseteks sobiv kui kahe kaalumise vahe, mis teostatakse 24 intervalli jooksul, ei erine rohkem kui 0,1 % eelmisest kaalumisest. (EVS-EN 322:2002)

2.1.2. Mõõte- ja katseseadmed

Paindetugevus, paindeelastsusmoodul ja survetugevus määrati universaalse katsemasinaga INSTRON 3369 (Joonis 8), mille maksimaalne lubatud koormus on 50 kN. Mõõtmisviga koormuse mõõterežiimis on $\pm 0,5\%$ mõõdetavast väärtusest. Survekatsel mõõdeti siirdeid katsemasina komplekti kuuluva kontaktivaba tensormeetriga täpsusega $\pm 0,01$ mm. Mõõtmised teostati etteantud koormamise kiirusega ja mõõtmistulemused salvestati operatsioonitoravaraga Bluehill.

Katsekehade mõõtmiseks kasutati digitaalseid nihkkaliibereid Scala mõõtevahemikuga 0 – 150 mm ja 0 – 300 mm, mõlema nihkkaliiberi mõõtetäpsus on 0,01 mm (Joonis 9).



Joonis 8. Universaalne katsemasin INSTRON 3369.



Joonis 9. Elektroonilised nihkkaliiberid.

Katsekehade kaalumiseks kasutati kaalu Kern 572, mõõtevahemikuga 0 – 20000 g, täpsusega 0,01 g (Joonis 10).



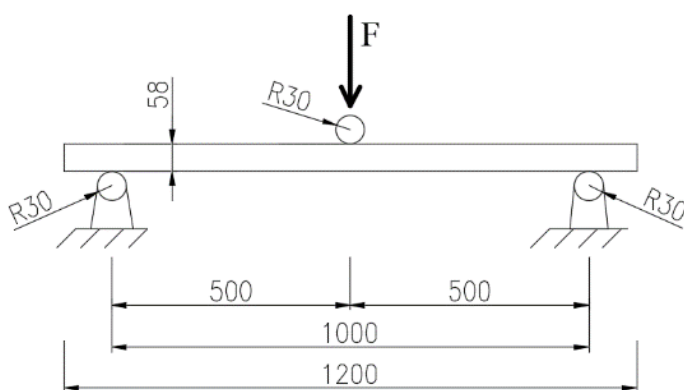
Joonis 10. Kaal Kern 572.

2.1.3. Paindetugevuse ja elastsusmooduli määramine

Paindekatsete eesmärk oli kindlaks määrata põhuplaadi paindetugevus risti- ja piki plaati ning arvutada elastsusmoodul. Katsete tegemiseks kasutati kokku 24 katsekeha, mõõtudega 300 x 1200 x 58 mm. 12 katsekeha oli lõigatud risti plaadiga ja 12 katsekeha piki plaadiga. Katsed viidi läbi standardi EVS-EN 310:2002 järgi. Algselt plaaniti katsed viia läbi standardi EVS-EN 789:2004 järgi, aga vahetult enne katse läbiviimist selgus, et katsemasinal puudusid vajalikud mõõteseadmed antud katse läbiviimiseks. Seetõttu kasutati paindetugevuse ja paindeelastsusmooduli määramise kolmepunkti paindekatset. Katsekehade pikkus ja tugevate tsentrite vaheline kaugus tuleneb plaadi paksusest või maksimaalsest lubatud pikkusest 1050 mm. Uuritavad katsekehad on 58 mm paksud ja standardis märgitud katsekeha pikkuseks ei saanud võtta 20 kordset paksust. Standardis lähtudes võib katsekeha maksimaalne pikkus olla 1050 mm ja tugevate tsentrite vahe 1000 mm (EVS-EN 310:2002). Katsetel kasutatud katsekehad olid 150 mm pikemad.

Katsekehadel mõõdeti vastavalt standardi EVS-EN 325:2002 alusel plaadi pikkuse keskkoha laius ja paksuseks kasutati keskvaärtust, mis saadi plaadi mõõtmisel mõlemalt poolt keskkoha servadest.

Koormamise kiirus määrati selline, et maksimaalne koormus saavutatakse 60 ± 30 sekundi jooksul. Maksimaalne jõud määrati esimese katsekeha purunemise alusel. Paindekatse skeem on näidatud joonisel 11.



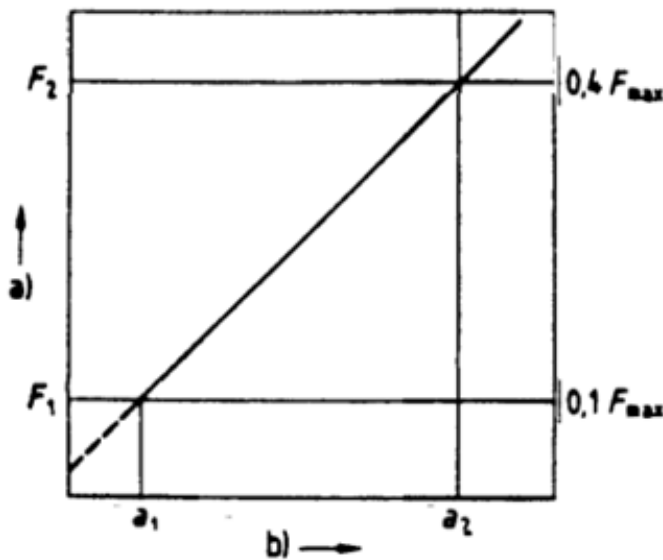
Joonis 11. Paindekatse skeem.

Universaalse katseseadme koosseisus olev arvuti, arvutiprogrammiga Bluehill arvutas paindetugevuse. Paindetugevus arvutati maksimumkoormusel F_{max} määratud paindemomendi M ja katsekeha ristlõikepinna suhtena. Paindeelastsusmoodul arvutati eraldi, lähtudes läbipainde koormamise graafikult saadud andmetest.

Paindetugevus f_m [N/mm²] arvutati valemiga 2.1. (EVS-EN 310:2002)

$$f_m = \frac{3 * F_{max} * l_1}{2 * b * t^2}, \quad (2.1)$$

kus F_{max} – maksimaalne jõud N;
 t – katsekeha paksus mm;
 b – katsekeha laius mm;
 l_1 – tugede tsentrite vaheline kaugus mm.



Joonis 12. Koormuse - läbipainde kõver elastse deformatsiooni piirides. (EVS-EN 310:2002)

Elastsusmoodul E_m [N/mm²] arvutati valemiga 2.2 (EVS-EN 310:2002):

$$E_m = \frac{l_1^3 * (F_2 - F_1)}{4 * b * t^3 * (a_2 - a_1)}, \quad (2.2)$$

kus l_1 – tugede tsentrite vaheline kaugus mm;
 b – katsekeha laius mm;

t – katsekeha paksus mm;

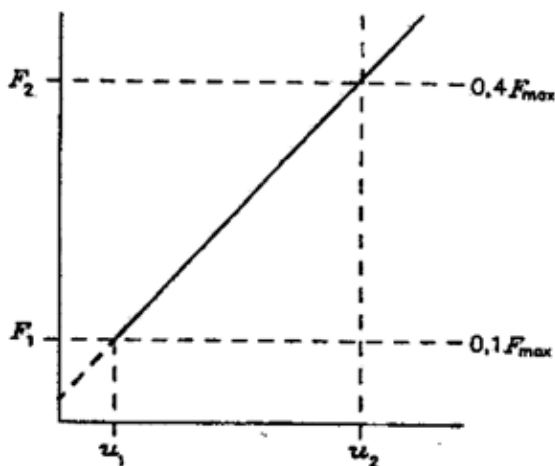
$F_2 - F_1$ – koormuse juurdekasv koormuse-läbipainde kõvera sirgjoonelisel osal N (Joonis 12);

$a_2 - a_1$ – katsekeha keskkohas läbipainde kasv jõu väärtuse F_1 suurenemisel väärtuse F_2 -ni mm (Joonis 12).

2.1.4. Survetugevuse ja surge elastsusmooduli määramine

Survekatsete eesmärgiks oli kindlaks määrata põhuplaadi survetugevus risti- ja pikiplaati. Katsed sooritati vastavalt EVS-EN 789:2004 nõuetele. Katsekehade mõõdud oli 200 x 300 mm. Enne katsetega alustamist hoiti katsekehi kliimakambris, mille temperatuur oli 20 ± 2 °C ja suhteline õhuniiskus $65 \pm 5\%$. Katsed viidi läbi universaalse katsemasinaga INSTRON 3369. Koormuse mõjumise kiirus reguleeriti nii, et maksimaalne koormus saavutatakse 300 ± 120 sekundi jooksul. Deformatsiooni mõõdeti katsekehal keskjoonest mõlemas suunas 55 mm kaugusele markeriga tehtud punktide kaudu seadme INSTRON 3369 koosseisus oleva optilise nihkeanduriga.

Elastsusmooduli leidmiseks kasutatakse surge deformatsiooni kõvera ja koormuse tõusu lineaarset osa (EVS-EN 789:2004).



Joonis 13. Koormuse - deformatsiooni graafik (EVS-EN 789:2004).

Surve elastsusmoodul arvutati valemiga 2.3 (EVS-EN 789:2004):

$$E_m = \frac{(F_2 - F_1) * l_1}{(u_2 - u_1) * b * t}, \quad (2.3)$$

kus E_m on elastsusmoodul N/mm²;

b – katsekeha laius mm;

t – katsekeha paksus mm;

l_1 – mõõdetavate nihkepunktide vahe mm;

$F_2 - F_1$ – koormuse juurdekasv koormuse-surve kõvera sirgjoonelisel osal N (Joonis 13);

$u_2 - u_1$ – katsekeha deformatsiooni kasv jõu väärtuse F_1 suurenemisel väärtuse F_2 ni mm. (Joonis 13)

Survetugevus arvutatakse valemiga 2.4 (EVS-EN 789:2004):

$$f_c = \frac{F_{max}}{b * t}, \quad (2.4)$$

kus f_c – survetugevus N/mm²;

F_{max} – maksimaalne jõud N;

b – katsekeha laius mm;

t – katsekeha paksus mm.

2.2. Kruvi lõike kandevõime määramise metoodika

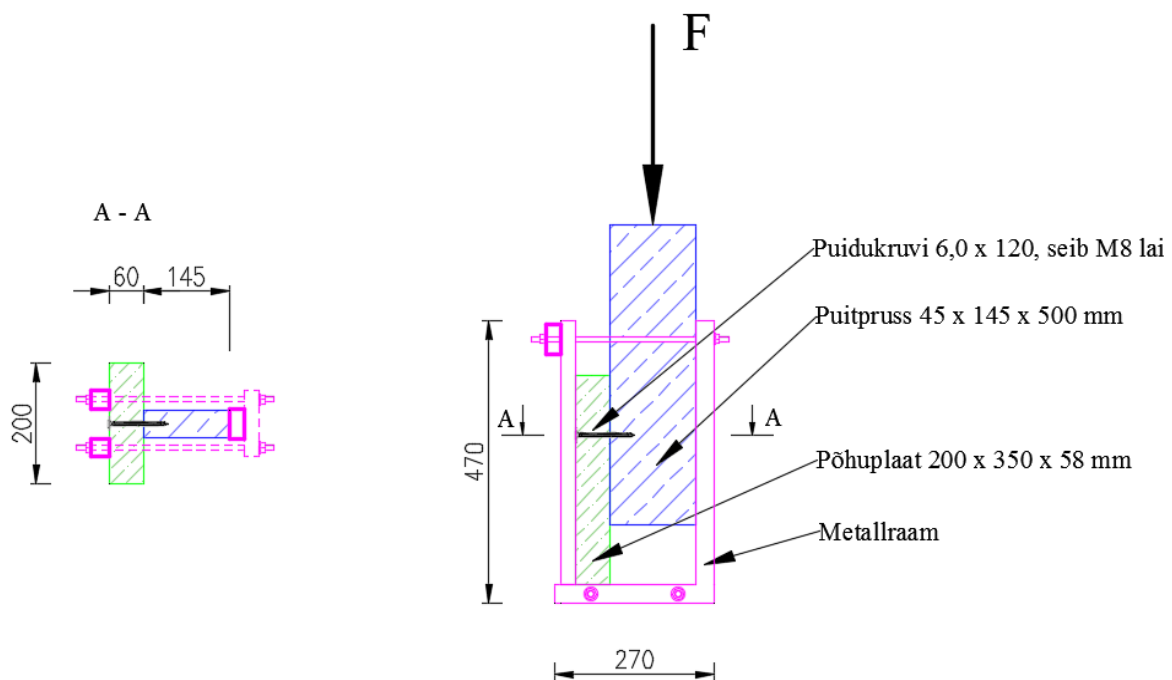
Katsete eesmärgiks oli leida kruvi maksimaalne nihkejõud F .

Puidukruvi on naagel tüüpi kinnitusvahend, olles parema kinnitustugevusega kui naelad vibratsiooni ja külgsuunas väljatõmbe tugevuse suhtes (G.Williamson, 2002).

Kruvi kandevõime katse läbiviimisel juhinduti standardist EVS-EN 26891:1999. Mis põhineb K.W. Johanseni poolt väljatöötatud voolamisteoorial, kus arvestatakse katsekehade erinevaid purunemise võimalusi.

Katsekehade mõõtude määramisel võeti aluseks standard EVS-EN 26891:1999 punkt 6. Standard ei määra otseselt katsekehade suurust, küll aga on välja toodud, et katsekehad peavad olema suurusega, mis võimaldavad määrata ühenduse tugevuse ja deformatsioonid

(EVS-EN 26891:1999). Sellest lähtuvalt võeti katsekehade mõõtude valikul aluseks seinakatsed, kus olid kinnituskruvide vahekaugused 250 mm. Sellest mõõdust juhindudes määrati põhuplaadi katsekehade mõõtudeks 200 x 350 mm. Põhuplaadi katsekehad kinnitati 6 x 120 mm puidukruvi ja M8 laiaseibiga, paksus 1 mm, puitprussi külge mille mõõtudeks oli 45 x 145 x 500 mm, tugevusklassiga C24. Samad kruvid, seibid ja puitprussi materjal olid kasutusel ka põhupaneelide katsetel. Katseteks kasutatud katsekehad ja katse skeem on välja toodud joonisel 14. Kruvi nihkekatseks lõigati kokku põhuplaatidest 24 katsekeha. 12 katsekaha pikiplaati ja 12 katsekeha risti plaati.



Joonis 14. Kruvi nihkekatse skeem.

Joonisel 14 tähistatud ja joonisel 15 näidatud metallraam valmistati vajadusest, et takistada katsekehade väljanõtkumist. Raam valmistati 30 x 30 x 2 mm ja 25 x 50 x 2 mm nelikanttorudest. Nelikanttorud keevitati omavahel kokku ja ühendati omavahel poltidega nii, et moodustus U kujuline tugiraam. Tugiraamistiku ja katsekehade toetuspind oli suhteliselt väike, mis ei tekitanud arvestatavat hõõrdumist.



Joonis 15. Kruvi nihkekatsel kasutatud metallraam.



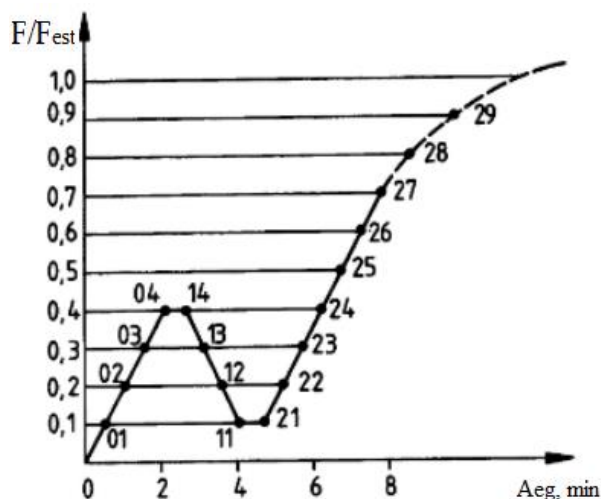
Joonis 16. Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruksioonide labori 40 tonnise survejõuga hüdraulilise press Form-Test.

2.2.1. Katsete läbiviimine

Katsed plaaniti algselt läbi viida läbi Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi puidulaboris punktis 2.1.2 kirjeldatud universaalse elektromehaanilise katsemasinaga INSTRON 3369 (Joonis 8), kuid proovikatsete käigus selgus, et katseseade ei võimalda standardi EVS-EN 26891:1999 järgi katset teostada ja sellepärast viidi katsed läbi Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruksioonide laboris oleval 40 tonnise hüdraulilise silindriga Form-Test (Joonis 16). Seadme mõõtmisviga koormuse mõõterežiimis on 0,1 mm mõõdetavast väärtusest. Mõõtmised teostati etteantud koormamise kiirusega ja mõõtmistulemused salvestati operatsioonitoravaraga Tiab Digital Controllers and Base Levels Software.

Katsed viidi läbi joonisel 17 kujutatud graafiku alusel, kus eeldatavaks maksimaalseks survejõuks määrati proovikatsetuste tulemusena 2,0 kN ja kiiruseks 0,4 kN/minutis. Katsekehadele rakendati esmalt, eeldatavast survejõust 40 % ehk 0,8 kN. Antud koormust

hoiti 30 sekundit ja siis langetati koormus 0,2 kN-ni ja hoiti 30 sekundit. 30 sekundi möödudes rakendati uuesti koormust katsekehale, kuni saavutati maksimaalne lubatud nihe 15 mm, või katsekeha purunemine. Teine koormamine viidi läbi 300±120 sekundi jooksul.



Joonis 17. Kruvi kandevõime surve avaldamise graafik.

Maksimaalseks jõuks F_{max} määrati jõud, mis mõõdeti katsekehadel, kui need saavutasid nihke üksteise suhtes 15 mm või katsekeha purunemise hetkel mõõdetud maksimaalne jõud.

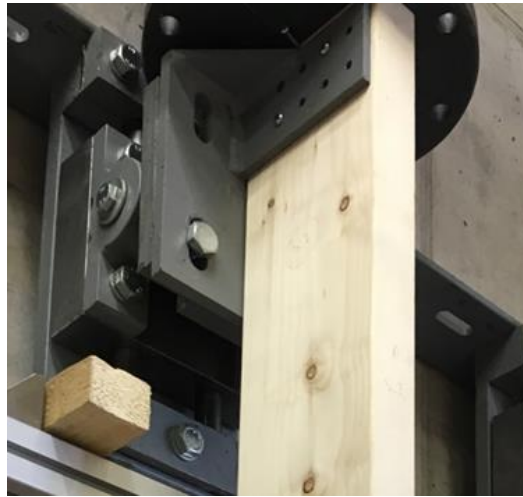
2.3. Põhu- ja OSB- plaatidest paneelide katsetamise meetodika vertikaal koormusel puitkarkassil

Saleda, keskselt surutud varda sirge tasakaaluasend muutub koormuse teataval väärtusel ebastabiilseks – varras nõtkub tasapinnast välja. Põiksuunas kinnitamata pikemad elemendid tuleb arvutada pikipaindele, mis seisneb varda kõverdumises kriitilisel koormusel. Varda nõtkumine vastab aga piirulukorrale, mida konstruktsiooni normaalsel eksploateerimisel ei või lubada (Just, 2018)

Katsete eesmärgiks oli uurida kui palju suurendab põhuplaat puitpostide nõtketugevust võrreldes OSB plaadiga. Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laboris oleval jõuseinal ja selle küljes paikneval konsooli.

2.3.1. Puitpostide nõtkekatse kirjeldus

Katsete esimeses etapis mõõdeti kõigi kasutatud vertikaalsete puitpostide nõtketugevus, et leida võimalikult sarnase nõtketugevusega postid raamide jaoks. Katsekehade nõtkekatses kinnitati posti ülemine ots vertikaal suunas liikuvale liigendtoele (Joonis 18) ja alumine ots liikumatule liigendtoele (Joonis 19).



Joonis 18. Ülemine liikuv-liigendtugi koos silindri ja posti vahelise metallplaadiga.



Joonis 19. Alumine liigendtugi.

Koormus rakendati katsekehadele vertikaalselt survesilindriga Rehobot CFA 750-200, mille maksimaalne lubatud koormus on 750 kN. Survesilindri ja posti vahele asetati metallist vaheplaat, sest posti ja surevsilindri vahe oli suurem kui silindri töömaa. Metallplaadi mõõdud olid \varnothing 200 mm, kõrgus 200 mm. Survesilindri Rehobot CFA 750-200 rõhuühikute teisendamine toimus vastavalt kalibreerimistunnistuse ATLF-17/0218 järgi, mille kohaselt 1 baarile vastab 1,057 kN. Rõhu mõõtmiseks survesilindris kasutati digitaalset rõhuandurit (Type FD821421U) täpsusega 0,1 bar. Koormust rakendati katsekehadele 300 ± 120 sekundi jooksul lineaarselt kuni katsekehad saavutasid lubatud maksimaalse nõtkes $L/300 = 8,3$ mm (EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2, 2015). Lubatud maksimaalne koormus leiti posti 45 x 145 x 2500 mm, C24 nõtketugevus arvutusi kasutades. Arvutus tulemuste põhjal ja varem katsetatud katsekehadega saadud tulemusi arvestades määrati survejõuks 40 ± 20 kN.

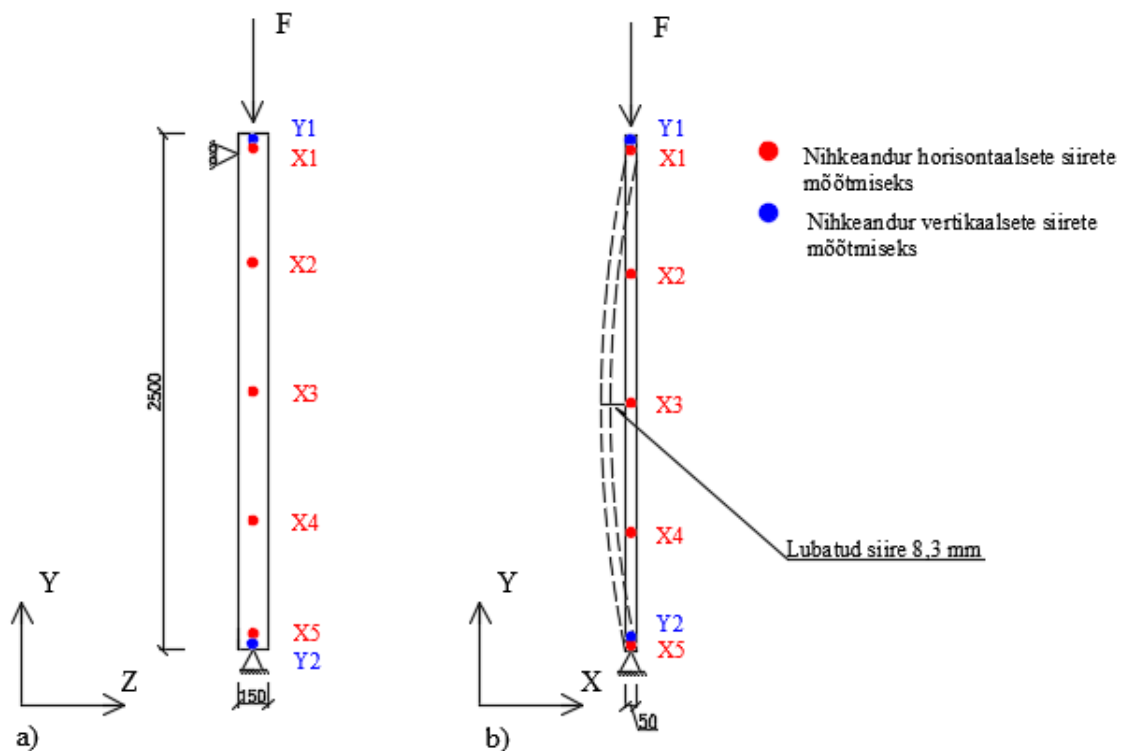
Nõtkekatse tulemuste mõõtmiseks kasutati seitset siirdeandurit. Siirdeandurid paigaldati spetsiaalsele alumiinium raamile (Joonis 20). Viis 150 mm siirdeandurit (Almemo type FWA150T) mõõtsid horisontaalset siiret, nendest kaks olid paigaldatud posti ülemisse ja alumisse otsa, ning kolm andurit posti keskosas $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ ja $\frac{3}{4}$ kõrgusele. Kaks 50 mm siirdeandurit (Almemo type FWA050T) mõõtsid vertikaalsiiret posti ülemisest ja alumisest otsast. Siirdeandurite täpsed asukohad on näidatud joonisel 22. Siirdeandurite lugemid salvestati andmesalvestajaga Almemo 5690-2 (Joonis 21).



Joonis 20. Posti nõtkekatse.



Joonis 21. Almemo 5690-2



Joonis 22. Posti 45 x145 mm nõtkekatse skeem ja nihkeandurite asukohta a) vaade küljelt, b) vaade eest.

2.3.2. Põhu- ja OSB plaatide katsekehade kirjeldus ja katsetamise metoodika

Katsete läbiviimiseks kasutati Ekopanely põhuplaate, OSB plaate ja C24 tugevusklassiga puitprusse.

Katsed kõikide plaatidega viidi läbi kahes etapis. Esmalt mõõdeti puitraamide vertikaalsete postide nõtketugevust ja siis kinnitati kruvidega raamile põhuplaat või OSB plaat ja rakendati uuesti vertikaalset survet raamile. Puitraamide vertikaalsed postid valiti välja nii, et ühel raamil oleks võimalikult sarnase nõtketugevusega puitprussid.

Kahel esimesel katse Ekopanely põhuplaatidega valmistati paneelid põhuplaadist mõõtudega 1200 x 2500 x 58 mm, mis olid kruvidega kinnitatud puitkarkassi külge. Puitkarkass koosnes kahest C24 tugevusklassiga vertikaalsest puitpostist mõõtudega 2410 x 145 x 45 mm ja kahest horisontaalsest puittalast tugevusklassiga C24 mõõtudega 1200 x 145 x 45 mm (Joonis 23).



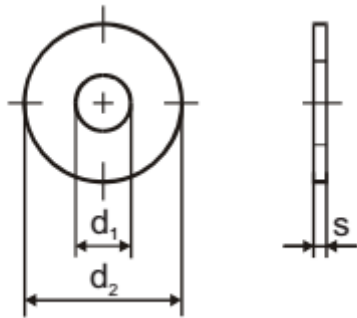
Joonis 23. Horisontaalsete puittaladega puitraam.

Postid ja horisontaalsed puittalad kinnitati omavahel 70 x 70 x 55 x 2,0 mm metallnurgadega. Nurgad kinnitati 5,0 x 40 mm puidukruvidega (Joonis 24).

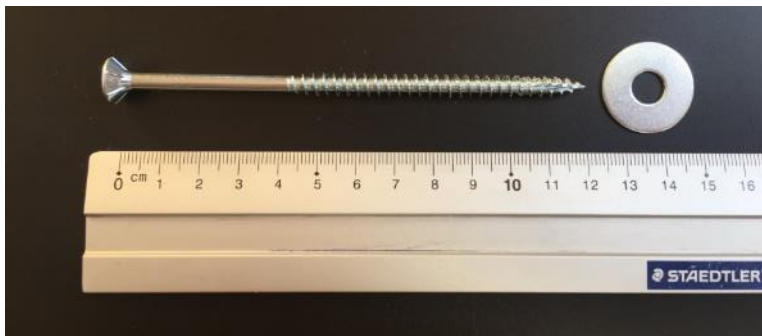


Joonis 24. Puitposti ja horisontaalse vöö kinnitus 70 x 70 x 55 x 2,0 mm metallnurgik.

Puitpostid kinnitati ülemise ja alumise vöö külge 600 mm vahega. Puitraami külge kinnitati põhuplaat Fix Master tsingitud puidukruvidega 6,0 x 120 mm ja seibidega M8 (Joonis 25, Joonis 26).

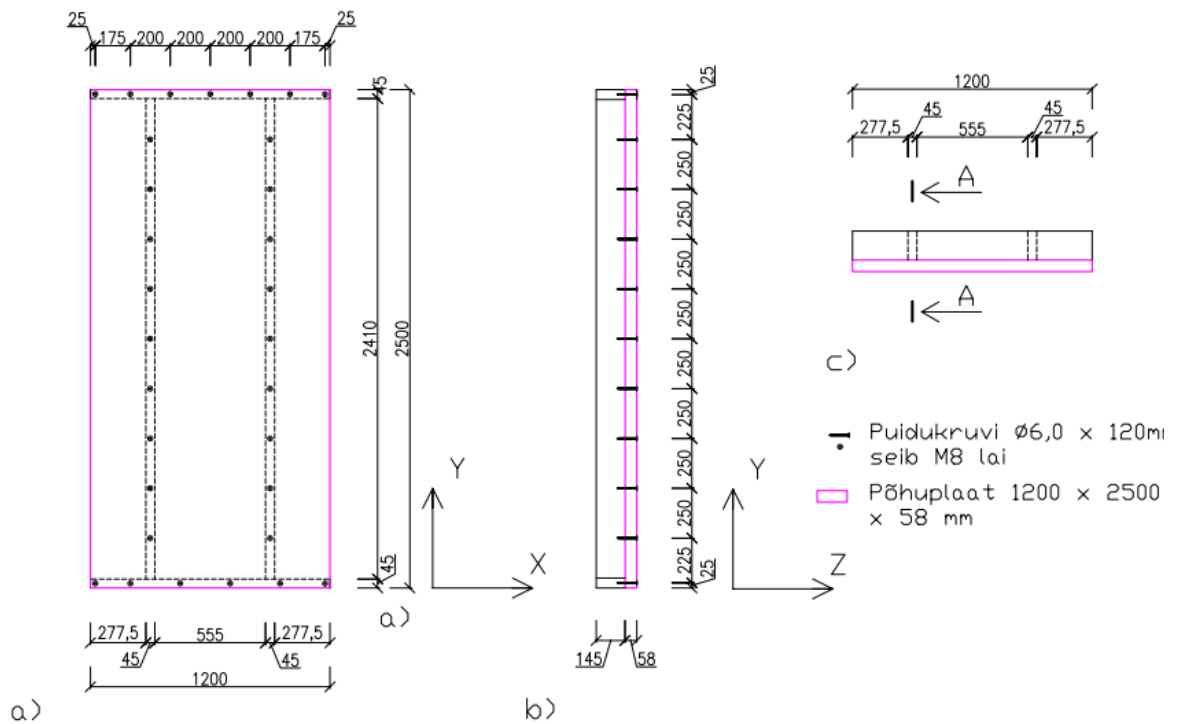


Joonis 25. Põhuplaadi kinnitamiseks kasutati seib M8; mõõdud d_2 – 24,0 mm; d_1 – 8,0 mm; s – 1,0 mm (Visimipex catalogue of fastener, 2018).



Joonis 26. Põhuplaadi kinnitamiseks kasutatud Fix Master tsingitud puidukruvi 6,0 x 120 mm ja M8 seib.

Põhuplaat kinnitati kruvidega 6,0 x 120 mm puitraami külge sammuga 250 mm. Põhuplaat-puitraam kompostiit seinapaneelid on esitatud joonisel 27.



Joonis 27. Horisontaalsete prussidega põhupaneeli katsekeha: a) paneeli eestvaade, b) lõige A-A, c) paneeli pealtvaade.

Kuna algne katseskeem ei andnud soovitud tulemust ja vertikaalse staatilise surve rakendamisel toimus vertikaalsete postide muljumine horisontaalsetesse vöödesse, siis muudeti katse metoodikat ja puitraamilt eemaldati horisontaalsed puitvööd.

Järgneval kolmel põhupaneelide katsel ja kõigil OSB paneelide katsel olid raamid ühesugused st. ilma horisontaalsete vöödeta. Vertikaalseteks postideks kasutati kahte C24 tugevusklassiga puitposti, mõõtudega 2500 x 145 x 45 mm. Postid ühendati omavahel 600 mm sammuga horisontaalsete puitklotsidega 555 x 145 x 45 mm (Joonis 28).



Joonis 28. Puitraam vertikaalsete vaheklotsidega.

Klotsid ühendati vertikaalsete puitpostidega omavahel 70 x 70 x 55 x 2,0 mm metallnurkadega. Nurgad (Joonis 24) kinnitati 5,0 x 40 mm puidukruvidega. Puitklotside ülesanne oli hoida vertikaalsete postide vahet 600 mm, kuna reaalsetes seinakonstruktsioonides on sõrestikpostide otsad fikseeritud. Põhupaneel mõõtudega 2500 x 1200 x 58 mm kinnitati kruvide ja seibidega vertikaalsete postide külge, mis on kirjeldatud eelnevalt (Joonis 25; Joonis 26). Kruvide sammuks oli 250 mm.

OSB paneelide katsetes kasutati OSB plaati mõõtudega 2550 x 1200 x 8 mm. Plaat kinnitati vertikaalsete postide külge Hobau kruvi HammerJack TX20 4,2 x 35 mm (Joonis 29). Kruvide samm on 250 mm (sama mis põhupaneelil).



Joonis 29. Hobau kruvi HammerJack TX20 4,2 x 35 mm.

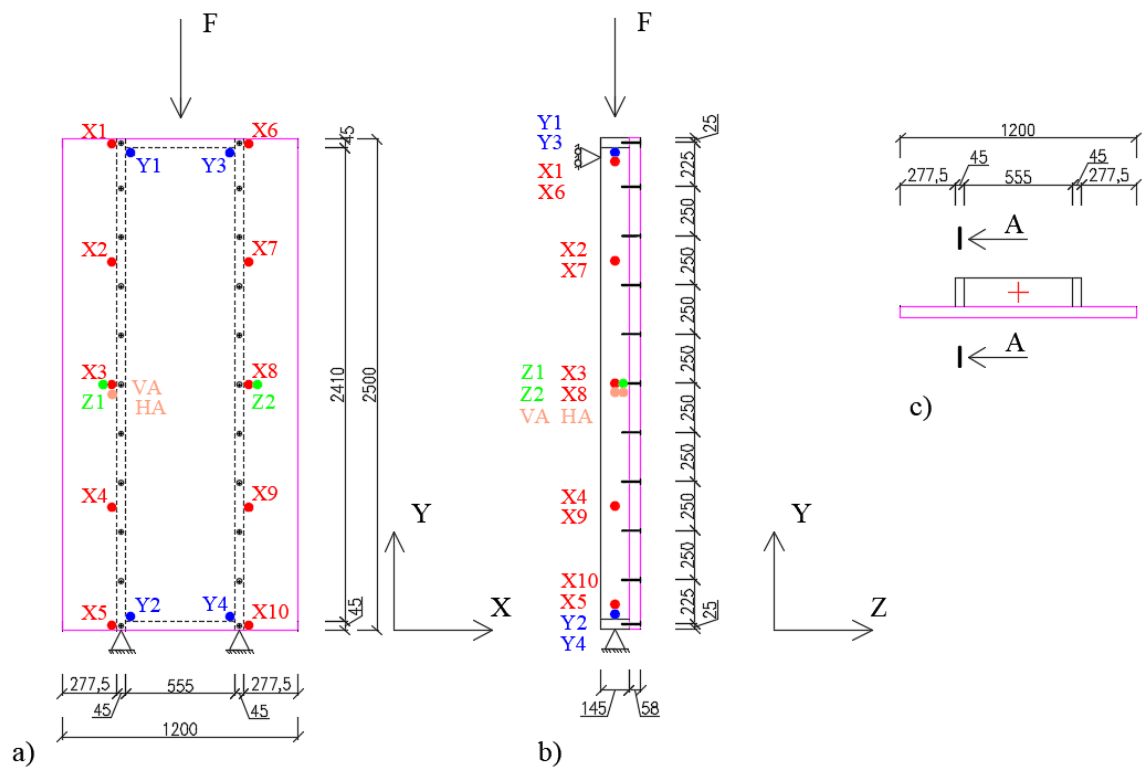
Katseteks valmistatud puit-põhu paneeli ja puit-OSB paneeli katsekehade joonised on välja toodud töö lisas (vt Lisa 2 Joonis L2.1; L2.2 ja L2.3).

Puitraame, puit-põhuplaat paneele ja puit-OSB paneele koormati ühtlase lineaarse vertikaalse jõuga mõlema sõrestikposti pealt. Selleks pandi mõlema vertikaalse posti otsa metallplaadid 200 x 200 x 20 mm, mille peale toetati HEA 240 tugevdatud metalltala, et jagada survesilindri koormus mõlemale puitpostile võrdselt (Joonis 30).



Joonis 30. Põhuplaat kinnitatud puitraamile.

Koormust rakendati katsekehadele vertikaalselt survesilindriga Rehobot CFA 750-200 ja käsipumbaga. Käsipump ja rõhuandur oli erinev võrreldes horisontaalsete puittaladega põhupaneelide katsetega, sest enne katseid avastati et, eelnevatel katsetel kasutatud käsipump ei anna piisavalt survejõudu survesilindrisse. Rõhku silindris mõõtis digitaalne rõhuandur (Type FD821421U9) täpsusega 0,1 bar. Survesilindri Rehobot CFA 750-200 rõhuühikute teisendamine toimus sama moodi nagu eelnevalt postide nõtkekatses oli kirjeldatud. Vertikaal koormust rakendati lineaarselt kuni katsekehade purunemiseni. Katsekehade purunemise ajaks planeeriti 300 ± 120 sekundit ja maksimaalseks jõuks oli arvestatud puitraamidel 100 ± 40 kN ja põhu-ja OSB paneelidel 280 ± 80 kN.



Joonis 31. Puitraami katseskeem ja siirdeandurite asukohad.

Seinapaneelide deformatsioone mõõdeti 18 siirdeanduriga. Kümme andurit mõõtsid horisontaalseid (X- telje suunalisi) siirdeid, viis andurit ($X_1 - X_5$) vasakpoolse posti siirdeid ja viis andurit ($X_6 - X_{10}$) parempoolse posti siirdeid. Vertikaalseid (Y- telje suunalisi) siirdeid mõõdeti nelja anduriga ($Y_1 - Y_4$), kummagi posti ülemisest ja alumisest otsast. Paneeli nõtkumist risti horisontaal teljega ehk Z – telje suunalisi siirdeid mõõdeti kahe siirdeanduriga, mõlema puitposti keskelt (Z_1 ja Z_2). Lisaks mõõdeti puitraami ja põhuplaadi ja OSB plaadi vahelist nihkumist, horisontaal suunas (X- telg) siirdeanduriga HA ja vertikaalsuunas (Y- telg) siirdeanduriga VA.

Siirdeandurite asukohad valiti sarnaselt varasemalt tehtud uurimistöödele, kus puit-betoon paneele koormati vertikaalse jõuga (Pihlapson, 2015) (Goroško, 2017) ja juhendajaga konsulteerimise teel. Katsekehade katseskeem ja andurite paiknemine on näidatud joonisel 31.

2.4. Statistiline andmetöötlus

Katsete käigus kogutud andmete töötlemiseks kasutati programmi MS Excel 2010, millega koostati töös olevad graafikud. Statistiliste näitajate leidmiseks nagu miinimum-, maksimum- ja keskmiste väärtustega, samuti standard hälve ning ülemised ja alumised usalduspiirid leiti funktsiooniga Describe Statistic. Lisaks kasutati vabavarana saadavat statistilist andmetöötlusprogrammi „R“, millega kontrolliti Shapiro-Wilk testi abil katsetulemuste vastavaust normaaljaotusele.

3. KATSE TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1. Paindekatsed

Paindekatsed viidi läbi 12 põhuplaadist lõigatud katsekehadega. Igast plaadist lõigati vastavalt lõike plaanile välja katsekehad piki plaati ja risti plaati, mõõtudega 300 x 1200 x 58 mm. Katsekehade lõike skeem on toodud lisas (vt Lisa 1). Kokku viidi läbi 24 katset ja katsete läbiviimiseks kasutati standardis EN-EVS 310:2002 väljatoodud metoodikat. Katsed viidi läbi katseseadmega INSTRON 3369 (Joonis 8).

3.1.1. Paindekatsed piki plaati lõigatud katsekehadega

Pikiplaati lõigatud katsekehadega viidi läbi 12 katset. Katsekehades asetsesid põhukiud risti plaadi pikema küljega. Katsetulemuste andmed on esitatud lisas (vt Lisa 3 Tabel L3.2).

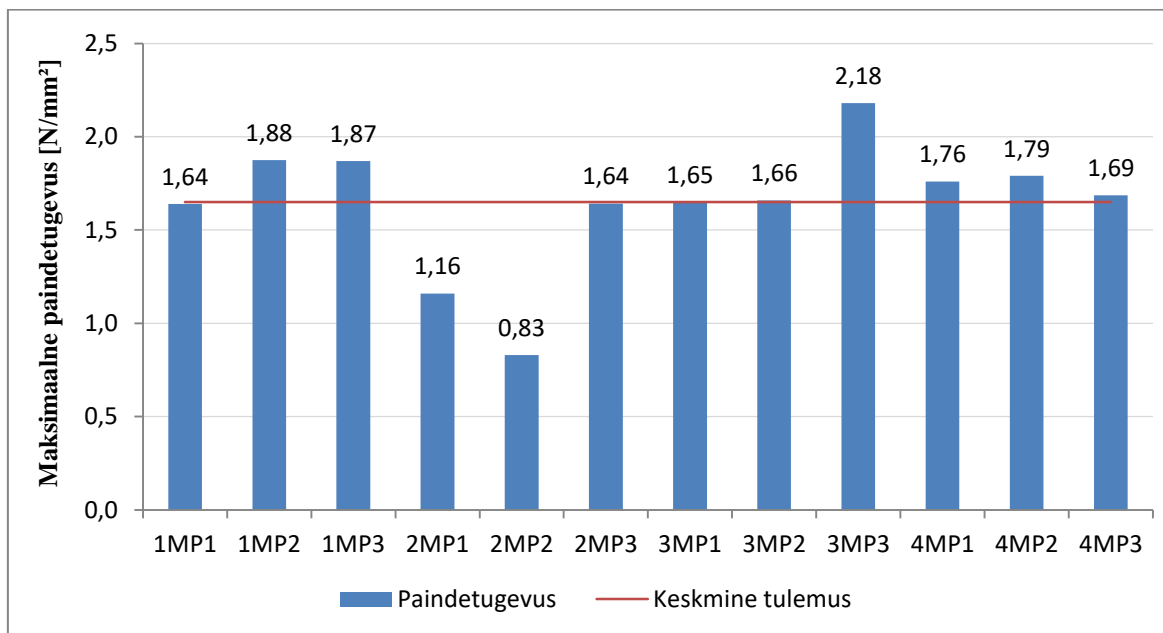
Programmiga R kontrolliti katsetulemuste normaaljaotust. Kasutati Shapiro-Wilk testi, kus saadi p väärtuseks 0,045, millest saab järeldada, et katsetulemused ei vasta normaaljaotusele. Lähtudes standardist EVS-EN 14358:2016, et kui uuritavaid katsekehasid on alla 40 tk, siis ei saa katsetulemusi väljendada mitteparameetriliste arvutusvalemite järgi (EVS-EN 789:2004).

Tabelis 2 on välja toodud kõik pikiplaati lõigatud põhuplaadi paindekatse seeria mõõdetud statistilised näitajad.

Tabel 2. Pikiplaati lõigatud katsekehade paindekatse statistilised tulemused

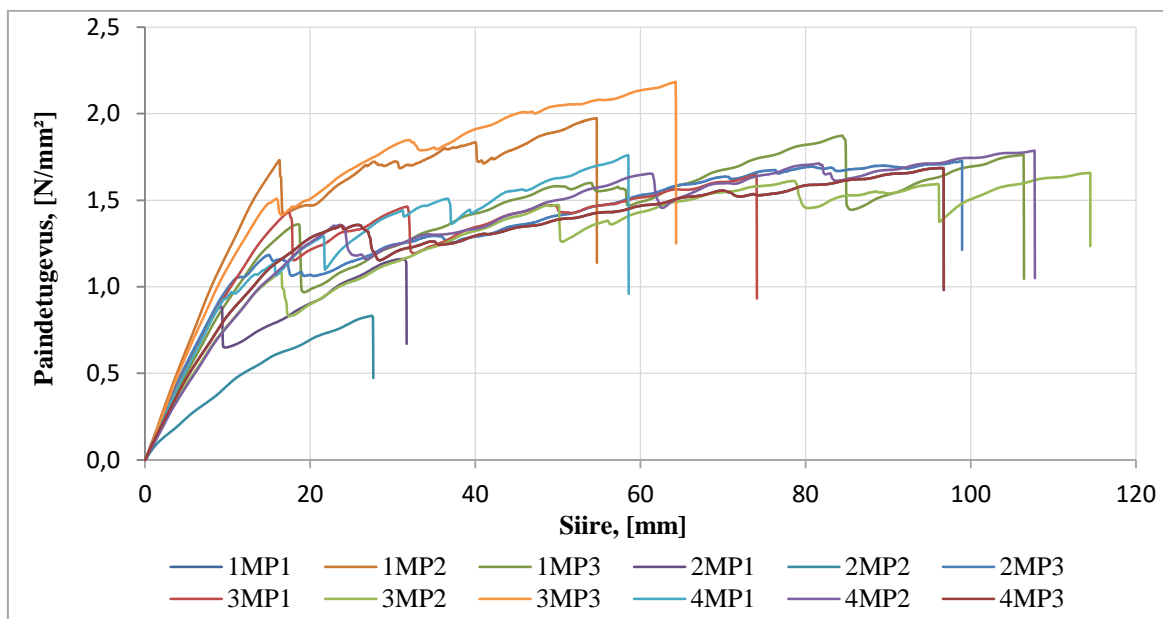
Statistilised näitajad	Paindetugevus [N/mm ²]
Keskmine	1,65
Standarthälve	0,35
Mediaan	1,67
Minimaalne väärtus	0,83
Maksimaalne väärtus	2,18
5 – protsentiili väärtus	0,93
95 – protsentiili väärtus	2,37

Katseseeria katsekehade arvutatud paindetugevuse tulemused on esitatud tulpdiaagrammina (vt Joonis 32).



Joonis 32. Piki plaati lõigatud katsekehade paindetugevus.

Katsetel esinenud paindetugevused ja läbipainded on esitatud graafiliselt joonisel 33 ja katsekehade purunemispildid on välja toodud lisas (Lisa 3).



Joonis 33. Paindekatse tulemused piki plaati lõigatud katsekehadega.

Graafikult on näha, et katsekehade kattepaberi purunemisega koos toimus ka katsekeha lõplik purunemine ja vastupanu võime täielik kadumine. Graafikutel olev esimene järsk liikumine on ilmselt tingitud põhukiudude omavahelisest liimühenduse kadumisest. Põhjus on ilmselt järgmine, et kuna põhu kiud asetsevad katsekehas risti suunaliselt, ehk katsekeha pikema küljega risti, siis määravaks saab põhu kiude omavahelise liimaine (ligniini) tugevus ja põhu kiudude tugevus otseselt mõjule ei pääse. Katseseerial erandiks oli katsekeha 2MP2 millel oli kattepaberi defekt ja katsekeha purunes tunduvalt varem ning 3MP2 mille kattepaber ei purunenud etteantud aja jooksul. Kui välja jätta katsekeha, mis oli kattepaberi defektiga, siis minimaalne paindetugevus oli 1,16 N/mm² ja maksimaalne 2,18 N/mm². See teeb erinevuseks 53,21 %, mis on küllaltki suur erinevus. Võrreldes katsetulemusi Praha Timber Research and Development Institute poolt läbiviidud katsetulemustega siis katseprotokolli järgi oli pikiplaadi paindetugevus 1,46 N/mm² (Ing. Jitka Berankova, 2008). Võrreldes käesolevas töös tehtud katsete keskmist tulemust, mis oli 1,65 N/mm², on tulemus 13% suurem kui tootja pakutud.

3.1.2. Paindekatsed risti plaati lõigatud katsekehadega

Katsekehad olid välja lõigatud 12 erinevast põhuplaadist vastavalt lõikeplaanile (Lisa 1).

Põhukiud olid selles katseseerias orienteeritud plaadi pikema küljega paralleelselt. Katsetulemuste andmed on esitatud lisas (vt Lisa 3. Tabel L3.3).

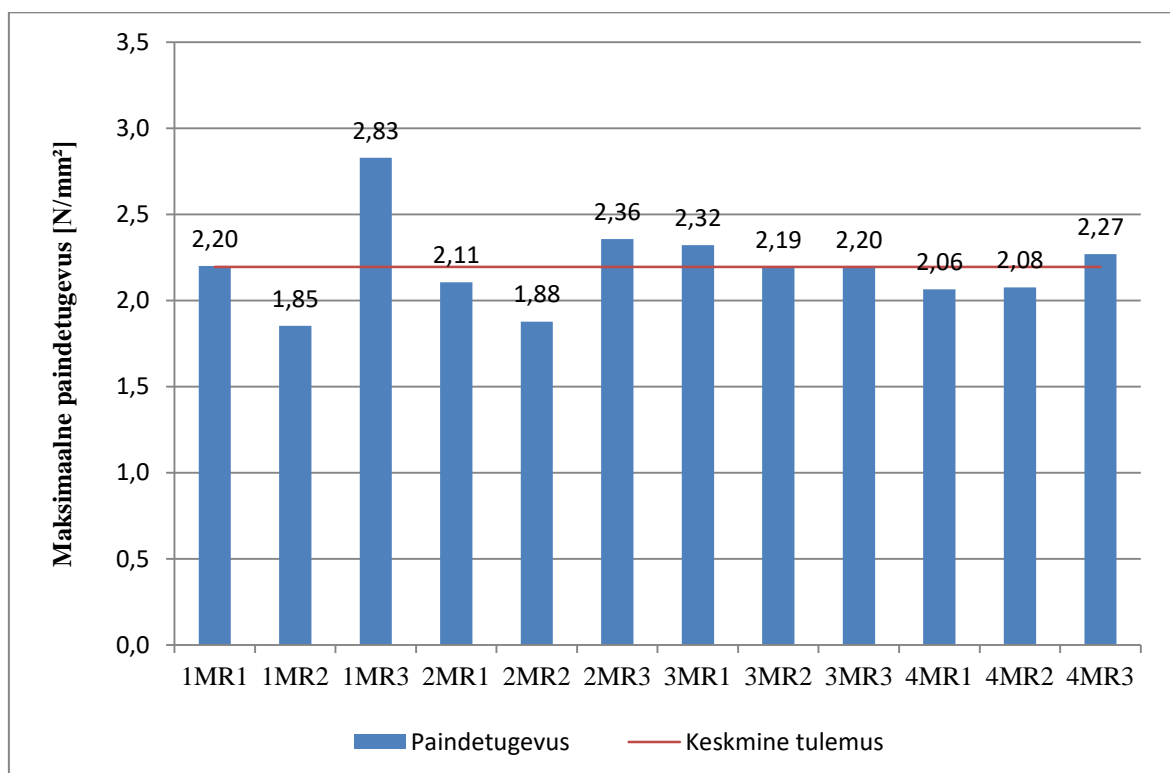
Programmiga R kontrolliti katsetulemuste normaaljaotust. Kasutati Shapiro-Wilk testi, millega saadi p väärtuseks 0,13, sellest saab järeldada, et katsetulemused vastavad normaaljaotusele.

Tabelis 3 on välja toodud kõik ristiplaati lõigatud põhuplaadi paindekatse seeria mõõdetud statistilised näitajad.

Tabel 3. Ristiplaati löigatud katsekehade paindekatsede statistilised tulemused

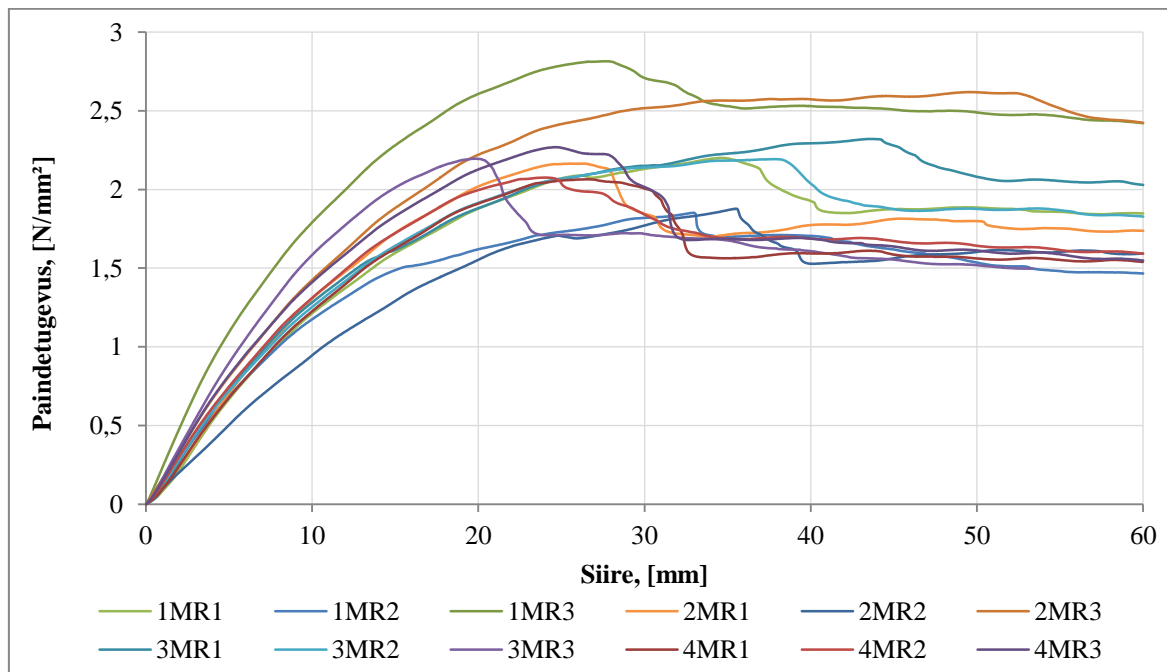
Statistilised näitajad	Paindetugevus [N/mm ²]
Keskmine	2,19
Standarthälve	0,27
Mediaan	2,19
Minimaalne väärtus	1,85
Maksimaalne väärtus	2,83
5 – protsentiili väärtus	1,64
95 – protsentiili väärtus	2,75

Katseseeria arvutatud tulemused katseandmete põhjal on esitatud tulpdiagrammina (Joonis 34).



Joonis 34. Risti plaati löigatud katsekehade paindetugevus.

Katsetel esinenud paindetugevused ja läbipainded on esitatud graafikul (Joonis 35) ja katsekehade purunemispildid on välja toodud lisas (Lisa 3).



Joonis 35. Paindekatse tulemused risti plaati lõigatud katsekehadega.

Võrreldes piki plaati lõigatud katsekehadega oli risti plaati lõigatud katsekehade paindekandevõime suurem 25 %. Katsekehad ei kaotanud oma kandevõimet järsult nagu pikiplaati lõigatud katsekehad. Peale alumise kattedepaperi purunemist katsekehad kaotasid oma kandevõime järkjärgult. Kuni kattedepaperi purunemiseni toimus nn elastne vastupanu ja peale kattedepaperi purunemist plastne vastupanu, kuni katse lõpetamiseni. Võrreldes antud keskmist tulemust 2,20 N/mm² Praha Timber Research and Development Institute poolt läbiviidud katse tulemusega 1,72 N/mm² (Ing. Jitka Berankova, 2008), siis katse tulemus on peaaegu 28 % suurem, kui tootja poolt pakutud.

3.2. Survekatsed

Survekatsed viidi läbi sarnaselt paindekatsetega. Pikiplaati ja ristiplaati katsekehad lõigati 12 erinevast põhuplaadist vastavalt lõike plaanile, mõõtudega 200 x 300 x 58 mm.

Katsekehade lõike skeem on välja toodud lisas (Lisa 1). Kokku viidi läbi 24 katset ja katsete läbiviimiseks kasutati standardis EN-EVS 789:2004 väljatoodud metoodikat. Katsed viidi läbi katseseadmega INSTRON 3369 (Joonis 8).

3.2.1. Survekatsed piki plaati lõigatud katsekehadega

Pikiplaati lõigatud katsekehades olid põhukiud orienteeritud plaadi pikema küljega paralleelselt. Katsetulemuste andmed on esitatud lisas (Lisa 4 Tabel L4.2). Tabelist puuduvad katsekeha 4CP3 andmed, kuna katsemasin selle katsekeha andmeid ei salvestunud.

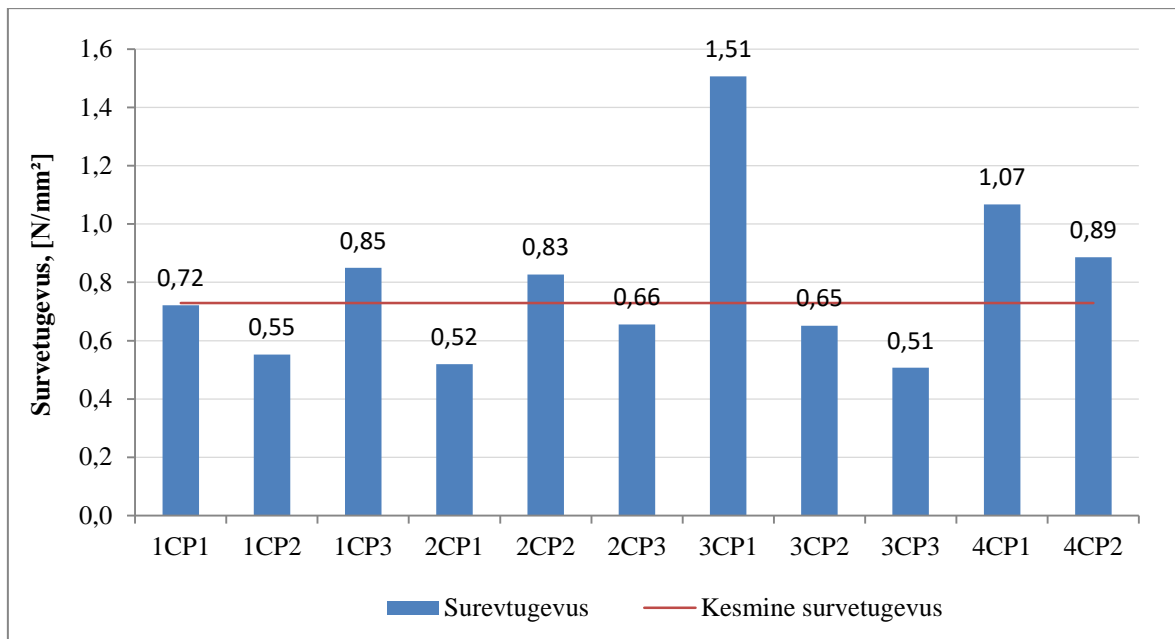
Katsetulemuse kontrolliti Shapiro-Wilk testiga, kus saadi p väärtuseks 0,05356. P väärtus on siin suurem kui 0,05, seega vastavad katsetulemused normaaljaotusele.

Tabelis 4 on välja toodud kõik pikiplaati lõigatud põhuplaadi survekatse seeria mõõdetud statistilised näitajad.

Tabel 4. Pikiplaati lõigatud katsekehade survekatse statistilised tulemused

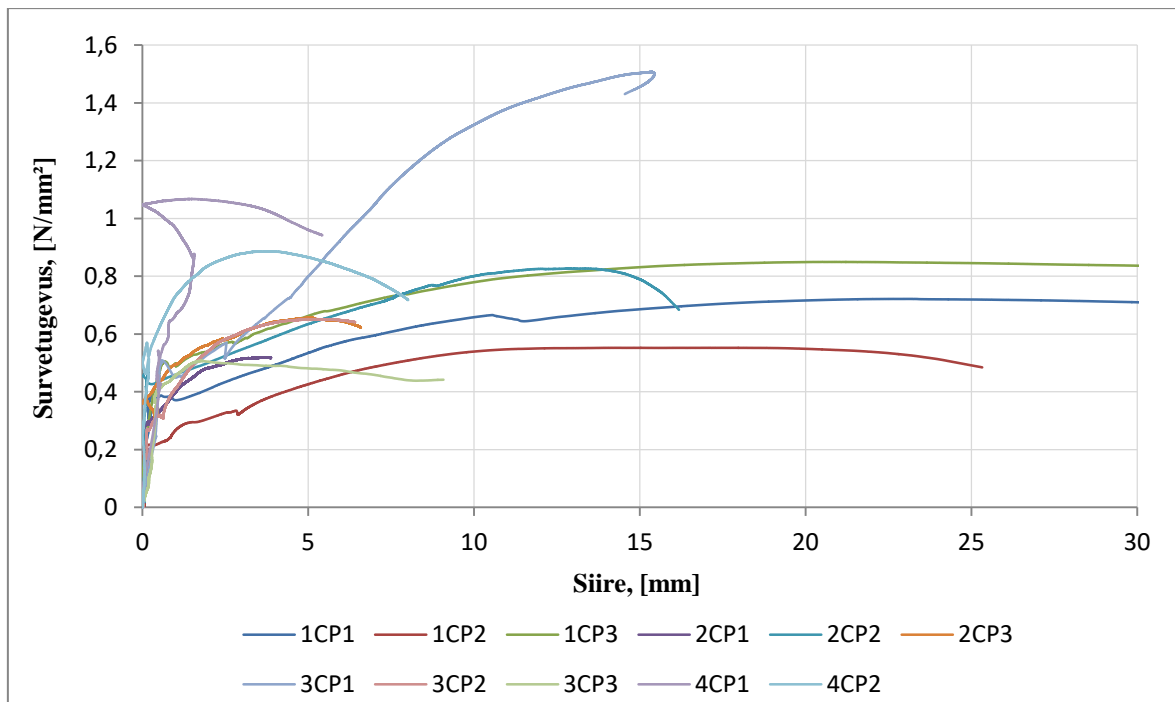
Statistilised näitajad	Survetugevus [N/mm ²]
Keskmine	0,79
Standarthälve	0,29
Mediaan	0,79
Minimaalne väärtus	0,51
Maksimaalne väärtus	1,51
5 – protsentiili väärtus	0,51
95 – protsentiili väärtus	1,29

Katseseeria survetugevuse arvatud tulemused katseandmete põhjal on esitatud tulpdiagrammina (Joonis 36) parema ülevaate eesmärgil.



Joonis 36. Pikiplaati lõigatud katsekehade survekatse tulpdiagramm.

Katsetel esinenud jõud ja deformatsioonid on esitatud graafikul (Joonis 37) ja katsekehade purunemispildid on esitatud lisas (vt Lisa 4).



Joonis 37. Survekatse tulemused piki plaati lõigatud katsekehadega.

Katsekehade tulemused erinesid üksteisest päris suurel määral. Minimaalne mõõdetud survetugevus oli 0,51 N/mm² ja maksimaalne mõõdetud survetugevus oli 1,51 N/mm², mis teeb erinevuseks 66,3 %.

3.2.2. Survekatsed ristiplaati lõigatud katsekehadega

Ristiplaati lõigatud katsekehadel olid põhukiud orienteeritud plaadi pikema küljega risti. Pikiplaati lõigatud katsekehade survekatse tulemused on esitatud lisas (vt Lisa 4 Tabel L4.3).

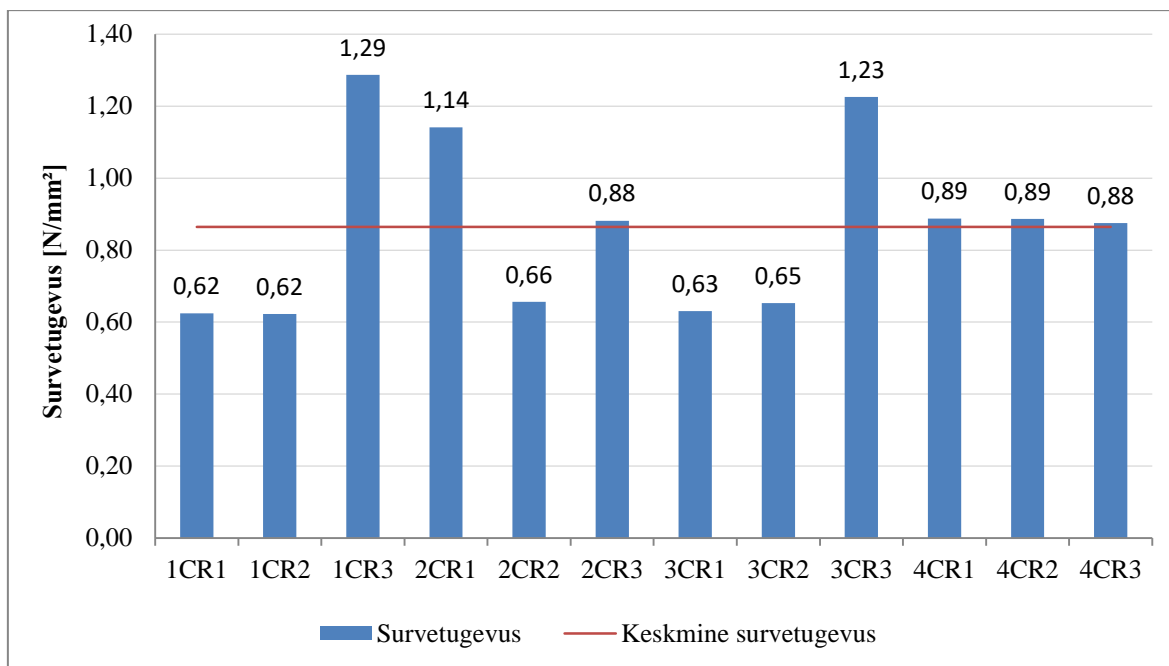
Katsetulemuste normaaljaotust kontrolliti Shapiro-Wilk testiga. P väärtuseks saadi 0,04368, mis näitab, et tegemist ei ole normaaljaotusega. Lähtudes standardist EVS-EN 14358:2016, et kui uuritavaid katsekehasid on alla 40 tk siis ei saa katsetulemusi väljendada mitteparameetriliste arvutusvalemite järgi (EVS-EN 789:2004).

Tabelis 5 on välja toodud kõik pikiplaati lõigatud põhuplaadi survekatse seeria mõõdetud statistilised näitajad.

Tabel 5. Ristiplaati lõigatud katsekehade survekatse statistilised tulemused

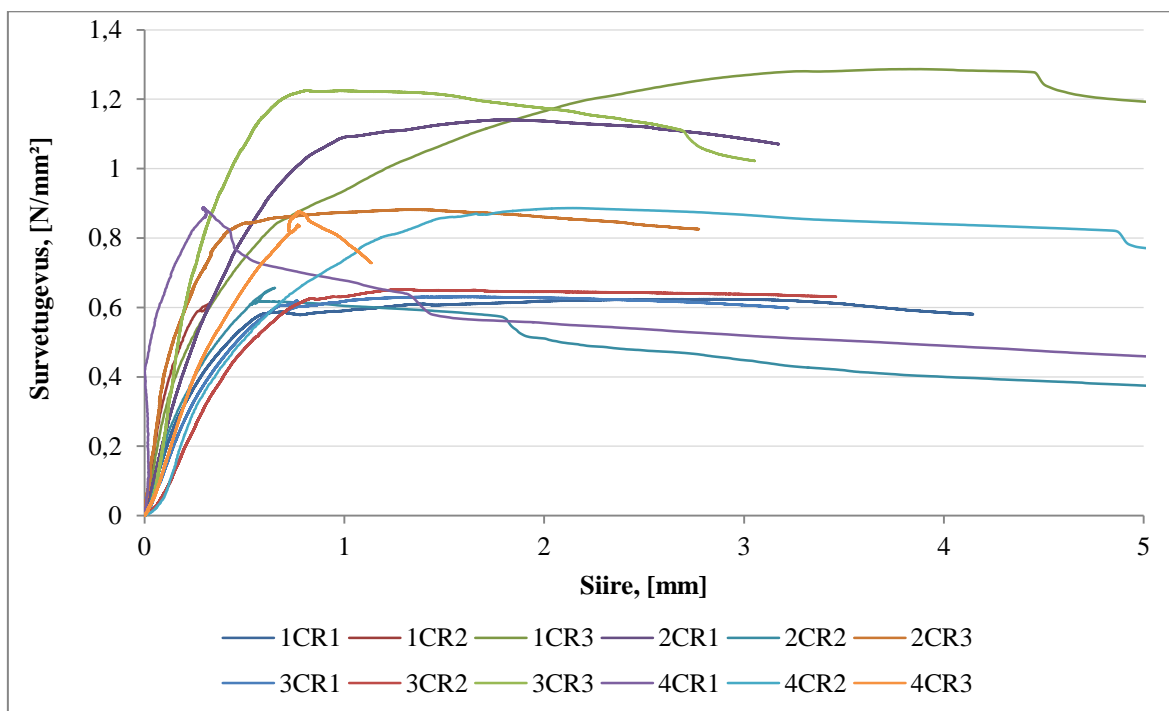
Statistilised näitajad	Survetugevus [N/mm ²]
Keskmine	0,86
Standarthälve	0,24
Mediaan	0,88
Minimaalne väärtus	0,62
Maksimaalne väärtus	1,29
5 – protsentiili väärtus	0,37
95 – protsentiili väärtus	1,35

Katseseeria arvatud tulemused katseandmete põhjal on parema ülevaate saamise eesmärgil esitatud tulpdiagrammina (Joonis 38) ja katsekehade purunemise pildid on välja toodud lisas (vt Lisa 4).



Joonis 38. Ristiplaati lõigatud katsekehade survekatse tulpdiaagramm.

Katsetel esinenud survetugevused ja deformatsioon on graafiliselt välja toodud joonisel 39.



Joonis 39. Survekatse tulemused ristiplaati lõigatud katsekehadega.

Minimaalne mõõdetud survetugevus oli 0,62 N/mm² ja maksimaalne mõõdetud tulemus oli 1,29 N/mm², mis teeb ülemise ja alumise väärtuse erinevuseks 48 %, mis on küllaltki suur erinevus. Samas on katse tulemused ühtlasemad kui piki plaati löigatud katsekehadel. Kui võrrelda piki- ja ristiplaadist löigatud katsekehade keskmisi survetugevuse väärtusi omavahel, siis ristiplaati löigatud katsekehade keskmine oli 0,86 N/mm² ja pikiplaati 0,79 N/mm², mis teeb erinevuseks 9 %.

3.3. Raamide ja seinapaneeli postide katse tulemused ja analüüs

Raamide ja seinapaneelidega tehti kokku kaheksa katset. Kolm katset OSB plaatidega ja viis katset põhuplaatidega. Kõikidel katsetel oli algselt plaanitud valmistada alusraam horisontaalsete ja vertikaalsete prussidega. Esimesel põhupaneeli katsel selgus, et paneel on oodatust tugevam ja eesmärgiks seatud postide märkimisväärsel siiret ei toimunud, toimus postide muljumine horisontaalsetesse vöödesse. Katse tulemusena sai otsustatud, et tuleb muuta katse skeemi ja ära jätta horisontaalsed prussid ning survet avaldada otse vertikaalsetele postidele.

Raamide ja seinapaneelide katsekehasid koormati staatilise jõuga kuni vähemalt üks raami postidest saavutas lubatud maksimaalse siirde 8,3 mm. Katsetati kahte tüüpi raame. Esimeses kahes põhuplaadi paneeli katses rakendati vertikaalset survet läbi raami horisontaalsete puittalade. Muudetud katseskeemiga katseseerias rakendati horisontaalne staatiline surve otse vertikaalsetele puitpostidele. Katsete läbiviimise aeg oli 420 ± 120 sekundit ja kõik katsed jäid lubatud aja piiridesse. Raamide ja seinapaneelide katsekehade katse tulemused on välja toodud lisas (vt Lisa 6, Lisa 7 ja Lisa 8).

3.3.1. Puitpostide nõtkekatsed

Lisaks raami katsetele tehti eelnevalt katsed puitpostidega. Katsete eesmärgiks oli leida seinapaneelide katseteks võimalikult ühtlase nõtkekandevõimega postid. Puitpostid olid mõõtudega 45 x 145 x 2500 mm (C24). Eurokoodeks 5 järgi on soovituslik maksimaalne horisontaalsiire ühe korruse ulatuses saepuidul $H/300$ mm (EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2, 2015). Antud puitpostide lubatud läbipaine koondatud põikkoormusest on $2500/300=8,3$ mm. Üksikpostide mõõdud, niiskussisaldused ja

koormused maksimaalse lubatud nõtkes juures ($H/300$) on välja toodud iga posti kohta lisas (vt Lisa 5 Tabel L5.1, L5.2). Puitpostide nõtkekatsete tulemused erinesid postide lõikes väga palju, vaatamata sellele, et kasutati tugevsorteeritud puitmaterjali, puidu tugevusklassiks oli C24. Kõige suurem nõtkekandevõime oli 69,98 kN ja kõige väiksem 10,90 kN. Esimeses katseseerias tuli teha üks lisa katse, et leida raami katseteks sobivad puitpostid. Kuna hilisemalt muutisime katse metoodikat, siis kõik nõtkekatse läbinud puitposte raami ja seinapaneeli katsetustel ei kasutatud. Hilisematest katsetustest jäid seetõttu välja puitpostid nr 4 ja 5.

3.3.2. Horisontaalsete prussidega põhupaneeli postide katsete analüüs

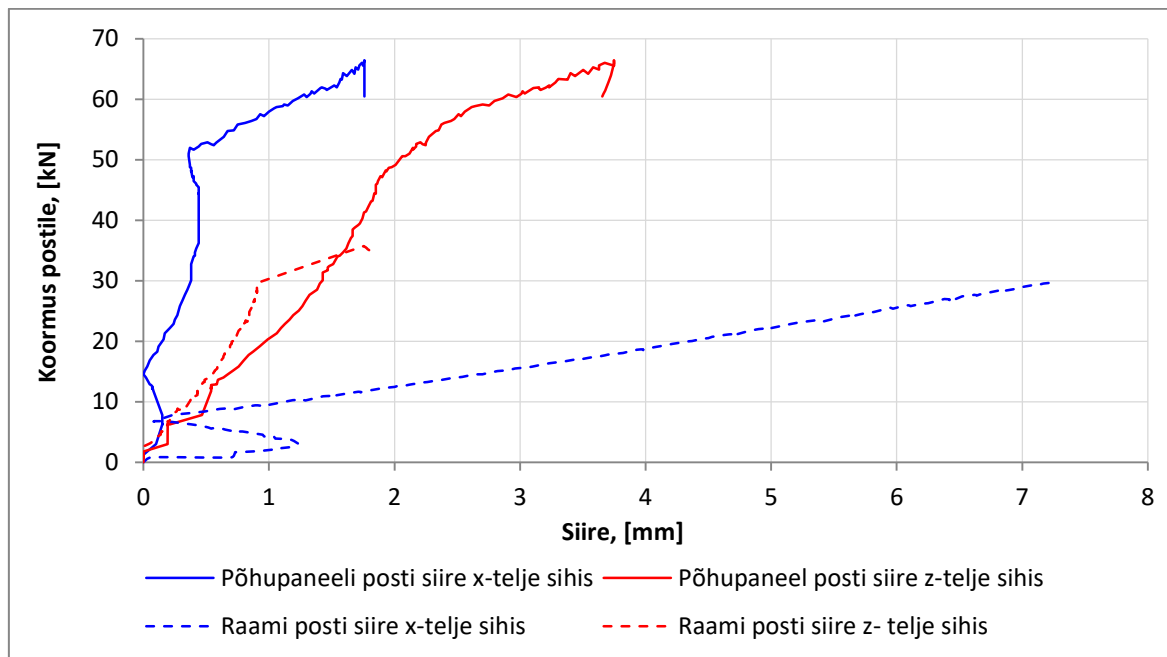
Horisontaalsete prussidega põhuplaatidest paneelidega katseid tehti kokku kaks, sest katseteks olid paneelid ette valmistatud, ja peale esimese katse tulemuste põhjal tehtud otsust, uuele katseskeemile ümber kohandada ettevalmistatud paneele ei saanud.

Vertikaalse surve tagajärjel toimus ülemise ja alumise horisontaalse prussi muljumine. Muljumise pildid vt lisast (Lisa 9). Esimesel katsel rakendati seinapaneelile maksimaalset survet 132,91 kN ehk ühele paneeli postile 66,455 kN ja teisel katsel 202,88 kN ehk posti kohta 101,44 kN. Esimesel katsel rakendatud surve paneelile jäi tehnilistel põhjustel madalamaks kui algselt oli plaanitud.

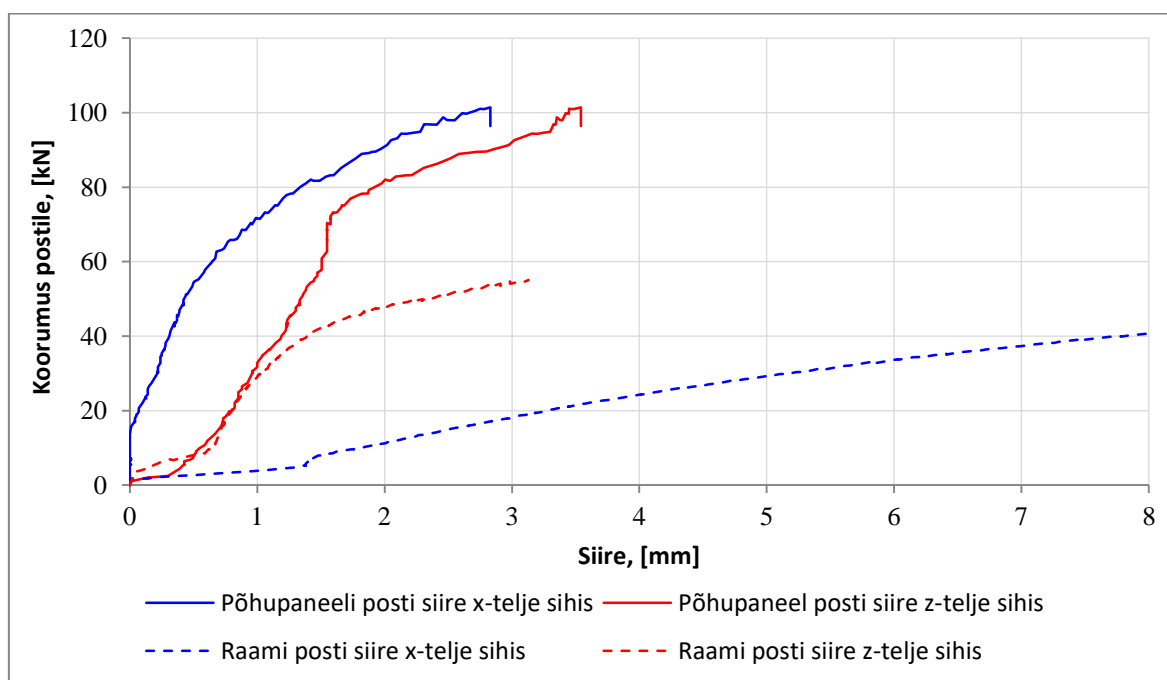
Esimesel katsel mõõdeti vasakpoolisel postil maksimaalseks siirdeks 1,76 mm horisontaal sihis (x-telje suunas) ja seinplaadiga risti suunas nõtkus vasakpoolne post välja 2,38 mm (z-telje suunas). Parempoolse posti nõtked olid vastavalt 1,36 mm horisontaal sihis (x-telje suunas) ja 3,75 mm risti plaadiga (z-telje suunas). Teisel katsel olid vasakpoolse posti x-telje suunaline maksimaalne nõtkes 2,83 mm ja z-telje suunas 3,54 mm. Parempoolsel postil x-telje suunaline nõtkes 0,97 mm ja z-telje suunaline nõtkes 1,53 mm.

Kahe katse põhjal saab järeldada, et põhuplaat takistas vertikaalsete puitprusside x-telje suunalist nõtkumist ja suurem nõtkumine toimus z-telje suunas, samuti toimub koos postide nõtkumisega postide muljumine ülemisse ja alumisse puitvõösse. Põhuplaadi lisamine suurendas karkassi posti kandevõimet, võrreldes ilma plaadita, esimesel paneelil 4 korda ja teisel paneelil 4,9 korda. Esimese paneeli karkassil saavutas vasakpoolne post nõtkes 3,75 mm vertikaalsel surve posti kohta 16,70 kN juures. Teisel seinapaneelil toimus

samaväärne nõtk (3,54 mm) ilma põhuplaadita vasakpoolses karkassi postis 20,50 kN juures posti kohta.



Joonis 40. Raami ja põhupaneeli A posti siirded x-telje ja z-telje sihis.



Joonis 41. Raami ja põhupaneeli B posti siirded x-telje ja z-telje sihis.

Katsed näitasid, et põhuplaat suurendab puitpostide kandevõimet (Joonis 40 ja Joonis 41). Katsete järelendusena saab öelda, karkassi postid ei saavutanud lubatud maksimum nõtkesuurust 8,3 mm, kuna enne toimus karkassipostide muljumine ülemisse ja alumisse vöösse. Katsete pildid muljumise kohta on välja toodud lisas (Lisa 9).

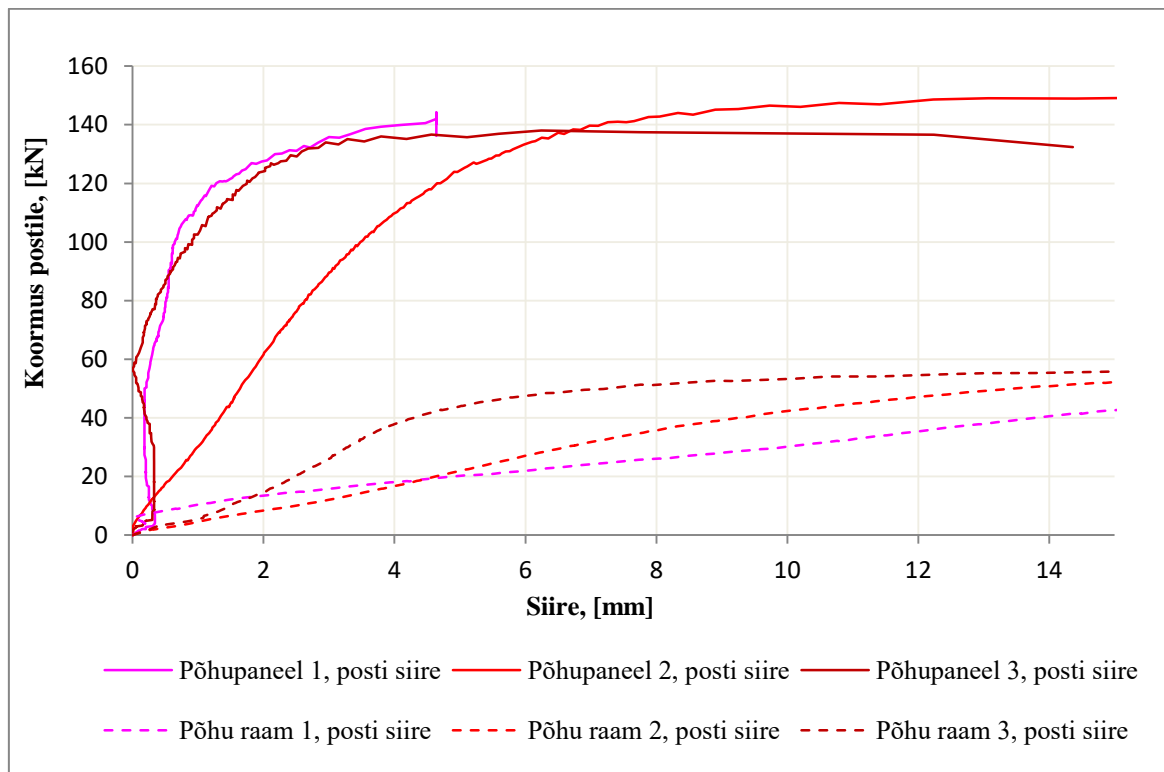
3.3.3. Ilma horisontaalsete prussidega põhupaneeli postide katsete analüüs

Põhupaneelide karkassi postidele rakendati otse vertikaalne staatiline surve kuni katsekehade purunemiseni. Kokku tehti kolm katset. Maksimaalsed rakendatud koormused katsekehadele ja purunemise pildid on välja toodud lisas (Lisa 7 ja Lisa 9).

Põhupaneelidega seinapaneelid osutusid oodatust tugevamaks. Paneelid võtsid suuremat koormust vastu, mille tõttu sai suurendatud eeldatavat purunemise aega 420 ± 120 sekundile. Seinapaneelid purunesid keskmiselt 458 sekundil. Kõigil kolmel paneelil toimus nõtkumine z-telje suunas. Kahel viimasel paneelil purunesid mõlemad postid, esimesel paneelil üks postides. Ükski paneelidest ei kaotanud peale maksimaalse kandevõime saavutamist oma kandevõimet järsku. Peale karkassipostide purunemist säilitasid paneelid mõningase kandevõime. Samuti ei toimunud katsete käigus kruvide täielikku läbitõmmet põhuplaatidest.

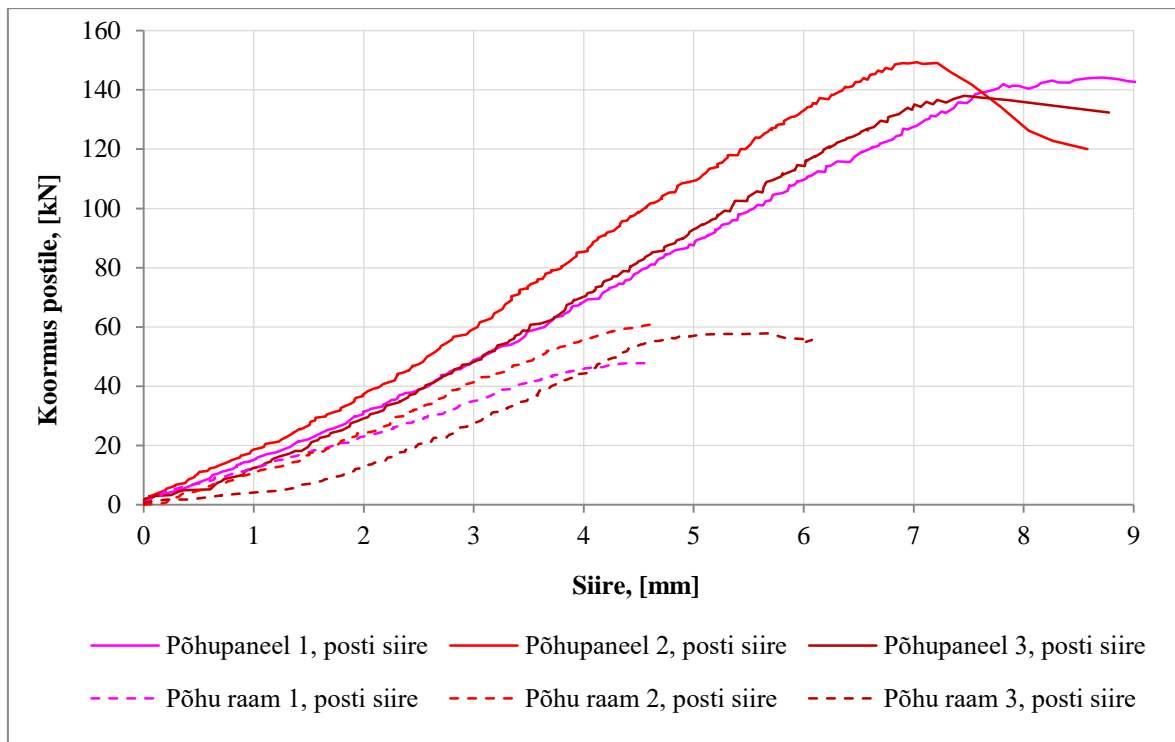
Esimene katsekeha purunes 288,35 kN juures, mis teeb ühe posti kohta 144,175 kN. Maksimaalseks postide siirdeks oli, vahetult enne purunemist, 4,64 mm z-telje sihis parempoolses postis (post 3.2). Samaväärne siire ilma põhuplaadita puitraamil oli 19,44 kN juures ühe posti kohta põhimõtteliselt mõlemal postil. Teine katsekeha purunes 298,72 kN juures, mis teeb ühe posti kohta 149,36 kN. Maksimaalseks siirdeks purunemise hetkel vasakpoolses postis (post 1.1) oli 16,02 mm x-telje sihis, mis on üle lubatud normväärtuse. Lubatud 8,3 mm normväärtus saavutati, 142,79 kN juures posti kohta, samas postis. Võrdluseks samal raamil ilma põhuplaadita oli lubatud maksimaalne siire 8,3 mm samal postil (post 1.1) 35,57 kN juures ühe posti kohta. Kolmas katsekeha purunes 276,07 kN juures, mis teeb ühe posti kohta 138,035 kN. Maksimaalne nõtkesuurus vahetult enne purunemist oli 6,24 mm z-telje sihis parempoolses postis (post 3.1). Samaväärne nõtkesuurus raamil oli 47,97 kN juures samal postil (post 3.1). Raamide ja põhupaneelide horisontaalsed siirded on graafiliselt välja toodud joonisel 42. Katse andmete võrdlemisel vähendas põhuplaat nõtket

esimeses katses 7 korda, teises 4 korda ja kolmandas 2,8 korda. Samuti saab katsete põhjal järeldada, et purunes alati post, mis oli nõrgem ka raami katsel.



Joonis 42. Raami ja põhupaneeli posti siirete võrdlus horisontaalsel (x-telje sihis) staatilisel koormamisel.

Katsekehade vertikaalsed siirded (y- telje sihis) staatilise koormamise järel on välja toodud graafiliselt joonisel 43. Vertikaalsiirdeid mõõdeti katsekehadel neljast kohast. Mõlema posti ülemisest ja alumisest otsast. Joonisel 43 on kokku liidetud ülemise ja alumise mõõtmistulemuse keskmised siirded. Graafikult on näha, et põhuplaat suurendab vertikaalsete deformatsioonide vastuvõtmist peaaegu kaks korda.



Joonis 43. Raamide ja põhuplaadiga seinapaneelide puitpostide vertikaalsed (y- telje sihis) siirded.

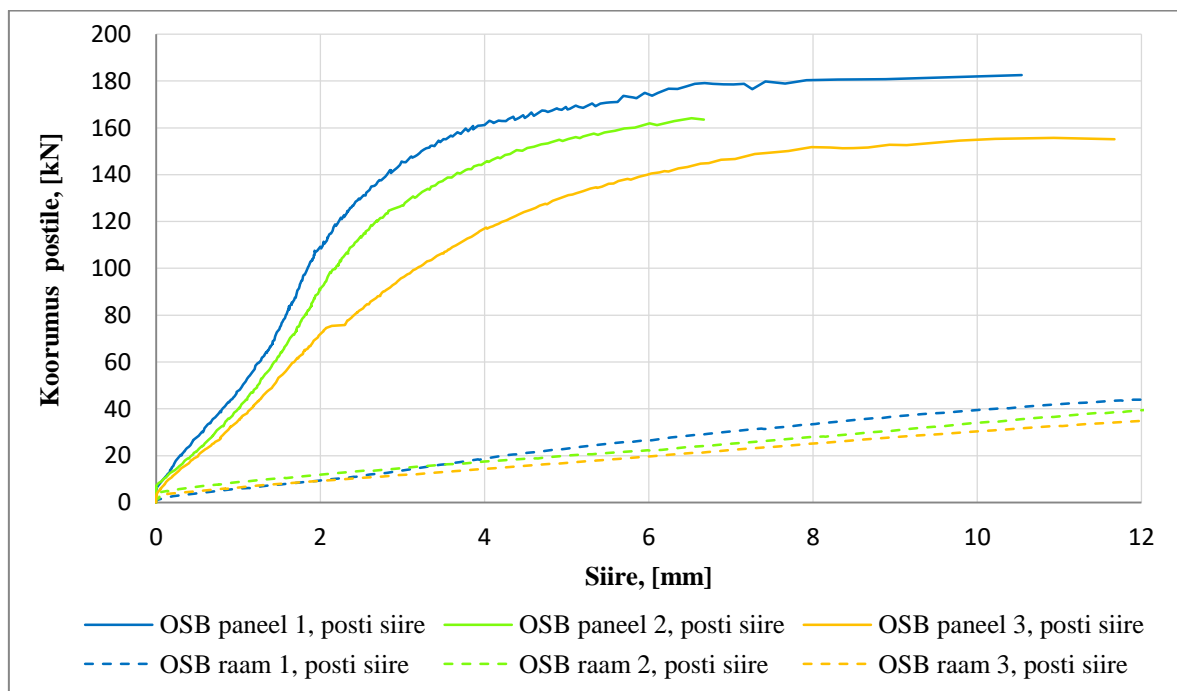
3.3.4. OSB plaatidega paneeli postide katsete analüüs

OSB plaatidest paneelidele rakendati vertikaalset survet sama skeemi alusel, nagu põhuplaatidest paneelidele, kuni katsekehade purunemiseni. Kokku tehti kolm katset ja maksimaalsed rakendatud koormused ja katsekehade purunemise pildid on välja toodud lisas (vt Lisa 8 ja Lisa 9).

Nii nagu põhuplaatidega paneelid, nii ka OSB plaatidega paneelid oli oodatust palju tugevama kandevõimega. Katsetele sai määratud sama purunemise aeg, 420 ± 120 sekundit, mis oli ka põhuplaatidest paneelidel. Kuna puitpostid olid väga erineva nõtketugevusega siis kulus esimese katsekeha purustamiseks 608 sekundit. Teisel katsepaneelil lõpetati katse vahetult enne purunemist, katse kestuseks jäi 495 sekundit. Kolmas katse lõppes katseseina purunemisega 460 sekundil. Esimesel OSB paneelil oli maksimaalne lubatud siire 8,3 mm z-telje suunas vasakpoolisel postil (post 1.2) 176.49 kN juures ühe posti kohta. Samaväärne siire oli raamil ilma OSB plaadita samal postil (post 1.2) 33,33 kN juures ühe posti kohta. Teisel OSB paneelil toimus suurim siire vasakpoolses postis (post 5.1) x-telje suunas ja see oli 6,67 mm 164,1 kN juures ühe posti

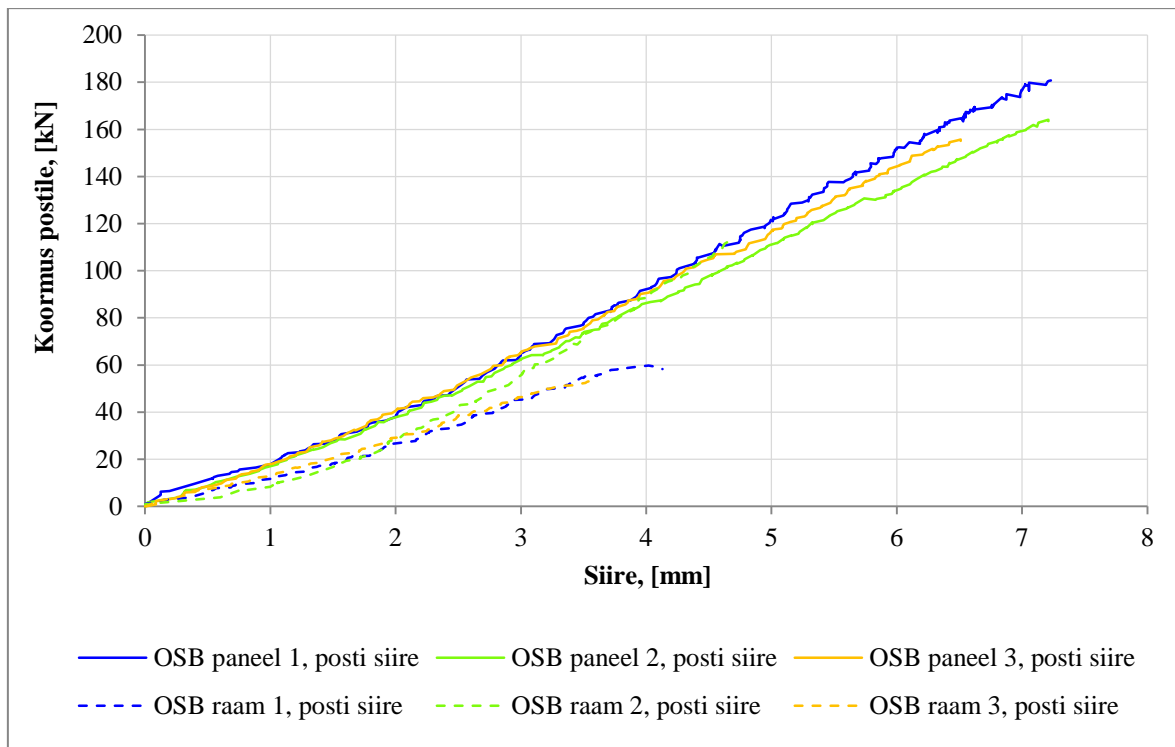
kohta. Samaväärne siire raamil toimus samal postil 24,00 kN juures posti kohta. Kolmandal paneelil toimus suurim lubatud nõtk, 8,3 mm x-telje sihis, vasakpoolses postis (post 6.1) 151,76 kN juures ühe paneeli posti kohta. Samaväärne siire raamil oli samal postil 25,1 kN juures. Z-telje suunaline nõtk oli kõige suurem esimesel paneelil purunemise hetkel 8,43 mm (vasak post 1.2), teisel paneelil oli Z-telje suunaline nõtk katse lõpetamise hetkel 2,28 mm (vasak post 5.1) ja kolmandal paneelil z-telje suunaline nõtk purunemise hetkel praktiliselt puudus, olles mõlemas postis alla 1 mm. Horisontaalsed siirded on graafiliselt välja toodud joonisel 44.

Seega saab järeldada et OSB plaat suurendas nende kolme katse põhjal postide nõtk tugevust esimesel paneelil 5,3 korda, teisel paneelil 6,7 korda ja kolmandal paneelil 6 korda.



Joonis 44. OSB raami ja OSB plaadist paneeli horisontaalsed (x-telje sihis) siirded.

Katsekehade vertikaalsed siirdeid analüüsiti sarnaselt põhupaneelide siiretega. Siirded staatilise koormamise järel on välja toodud joonisel 45. Vertikaalsiirdeid mõõdeti katsekehadel sarnaselt põhupaneelidega, neljast kohast, mõlema karkassi posti ülemisest ja alumisest otsast. Joonisel 45 on kokku liidetud ülemise ja alumise mõõtmistulemuse keskmised siirded. Jooniselt on näha, et OSB plaat suurendas esimesel ja kolmandal paneelil vertikaalsete deformatsioonide vastuvõtmist ligikaudu 40 %.



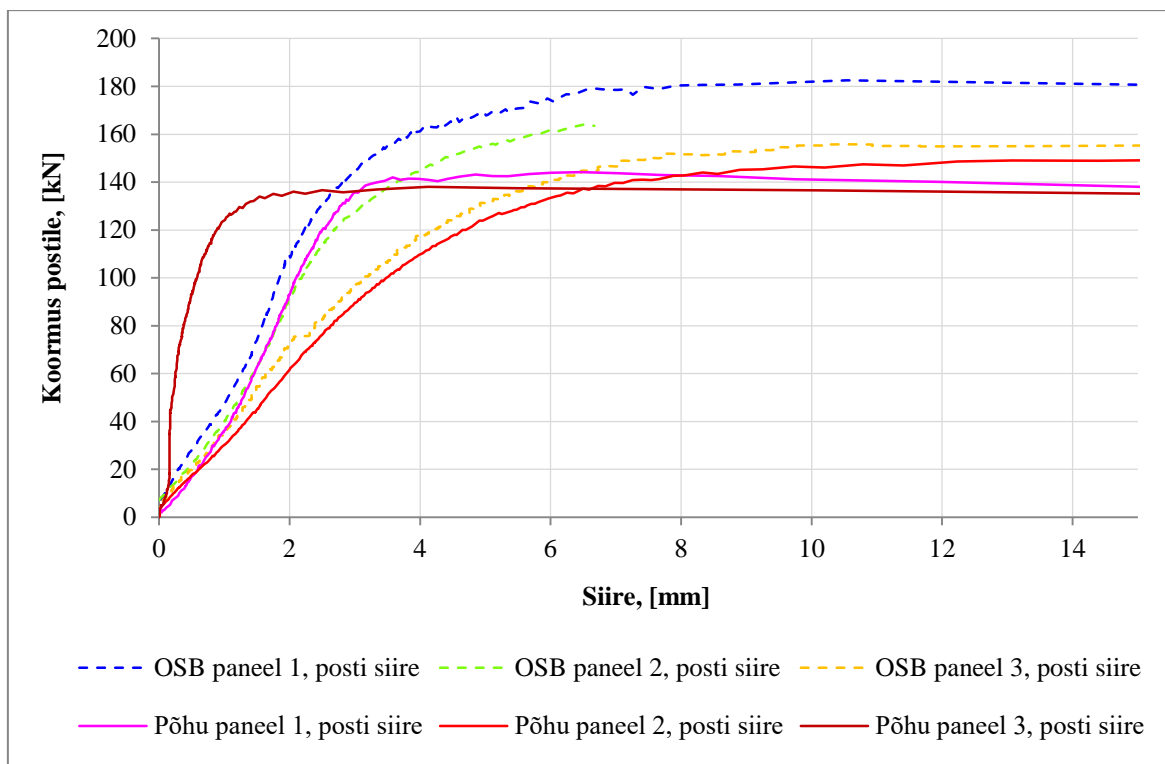
Joonis 45. OSB plaadist ja põhuplaadist paneeli vertikaalsed (y- telje sihis) siirded.

3.4. OSB- ja põhupaneeli postide siirete omavaheline võrdlus

Antud peatükis on võrreldud OSB- ja põhupaneelide postide vertikaalseid-, horisontaalseid siirdeid ja paneeli postide välja nõtkumist risti seina sihiga ehk z-telje suunalist siiret.

3.4.1. OSB- ja põhupaneeli postide horisontaalsiirete (x-telje sihis) võrdlus

Horisontaal siirete andmed mõõdeti paneelidel kümne anduriga. Andurite asukohad on näidatud töö teises osas oleval joonisel (vt Joonis 31). Analüüsi aluseks võeti anduri näit, mis näitas kõige suuremat deformatsiooni. Paneeli postide horisontaalsed siirded staatilisel koormamisel on esitatud joonisel 47.

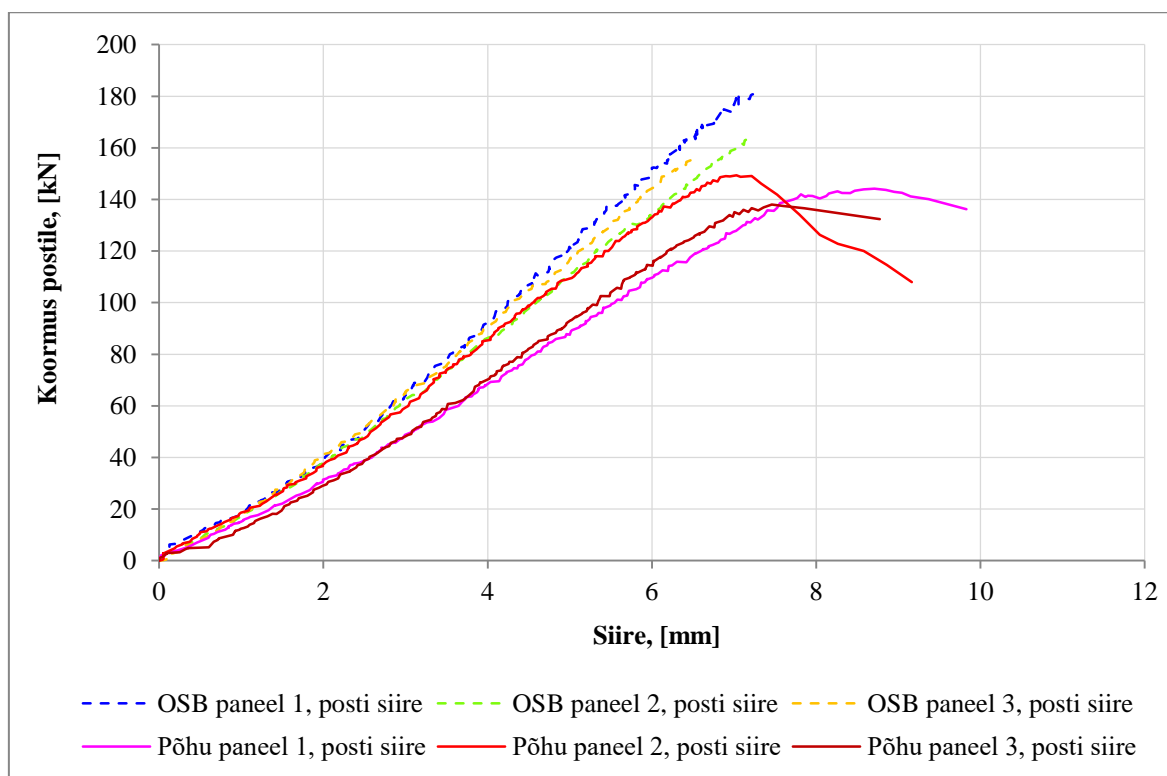


Joonis 46. OSB paneelide ja põhupaneelide horisontaalsed (x-telje sihis) siirded.

Joonise põhjal saab järeldada, et OSB kandevõime samade deformatsioonide juures on natuke suurem. Kolme katse keskmine maksimaalne horisontaalne posti siire purunemise hetkel oli OSB paneelidel 8,62 mm ja maksimaalne keskmine surve paneeli kohta 333,73 kN paneeli kohta. Samad näitajad põhupaneelidel olid 7,13 mm ja keskmine surve paneeli kohta 287,71 kN. Märkus: OSB 2 paneeli katse lõpetati vahetult enne paneeli purunemist ja maksimaalne vertikaalne siire oleks võibolla natuke suurem olnud. Sellepärast toon välja keskmise kandevõime võrdluse 6 mm deformatsiooni juures, kus kõik andmed olid olemas. Siin oli OSB paneeli keskmine kandevõime 317,05 kN ja põhupaneelil 276,74 kN. Kokkuvõttes põhupaneeli kandevõime oli nii purunemise momendil kui 6 mm siirde juures väiksem, vastavalt 13,7 % ja 12,71 %. Samas keskmine postide siire oli põhupaneelil väiksem, erinevus OSB paneeliga 2,25 mm (24 %). Kuid lõplike järeldusi siiski nende katsete põhjal teha ei saa kuna kasutatavad puitpostid olid väga erineva kandevõimega ja see mängib lõpptulemustes olulist rolli.

3.4.2. OSB- ja põhupaneeli postide vertikaalsiirete võrdlus

Vertikaalsiirdeid on võrreldud sama meetodiga, mis eelnevalt põhupaneelide ja nende karkasside analüüsis oli kasutuses. Vertikaalsiirded (y- telje sihis) on välja toodud joonisel 48.

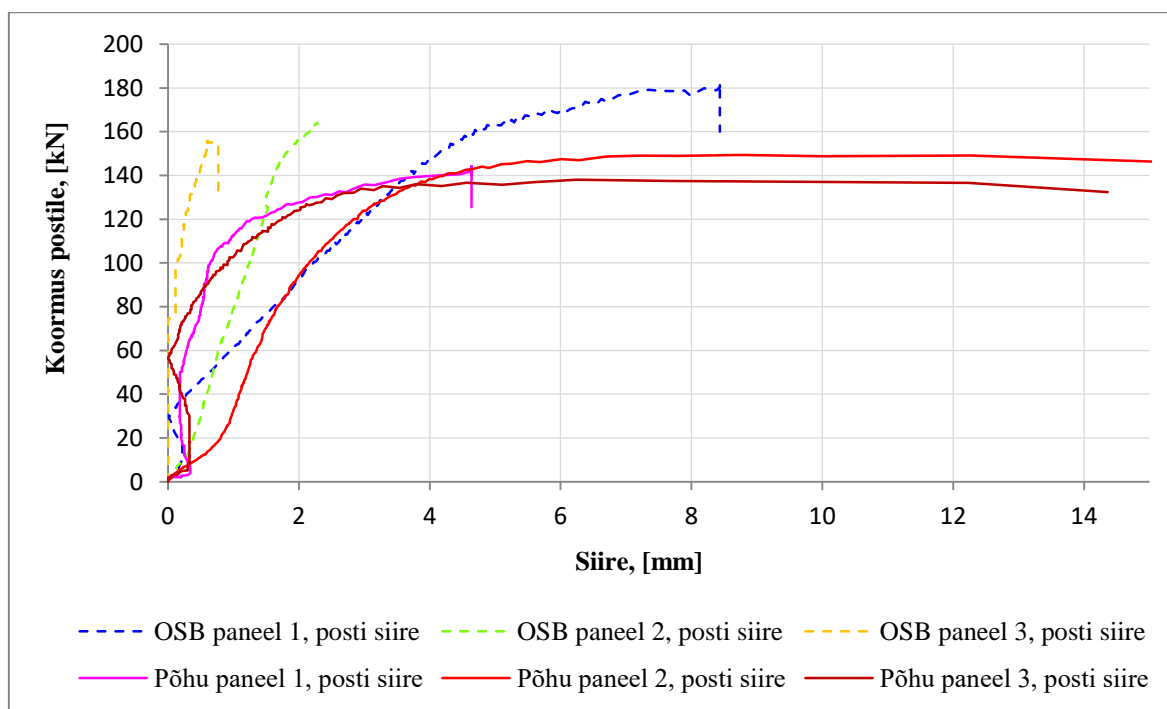


Joonis 47. OSB paneelide ja põhupaneelide vertikaalsete (y-tele sihis) siiret võrdlus.

Joonisel 48 on näha, et vertikaalsiirete osas on väiksed vahed võrreldes OSB- ja põhuplaadi paneelidel. Keskmiselt oli OSB paneelidel posti keskmine vertikaalne siire purunemise hetkel 6,98 mm ja keskmine vertikaalne staatiline surve 166,86 kN posti kohta. Põhupaneelidel oli posti keskmine vertikaalne siire purunemise hetkel 7,73 mm ja keskmine staatiline surve 143,85 kN posti kohta. OSB paneeli postide kandevõime oli kolme katse põhjal suurem 13,8 % ja vertikaalsete siirete vahe 0,75 mm ehk 10,7%.

3.4.3. OSB- ja põhupaneeli postide z-telje suunaliste siirete võrdlus

Plaadi nõtkumist risti plaadi teljega ehk z – telje suunalist nõtkumist mõõdeti kahe anduriga. Kummalgi karkassi postile oli paigaldatud $\frac{1}{2}$ kõrgusele üks nihkeandur. Nihkeandurite asukohad on toodud välja töö teises osas (vt Joonis 31).



Joonis 48. OSB- ja põhupaneeli z-telje siirete võrdlus.

Joonisel 49 on näha, et z-telje suunaline nõtk on põhupaneeli postidel kokkuvõttes suurem kui OSB paneeli postidel. OSB paneelidest ainult esimesel OSB paneeli vasakpoolsele postile oli deformatsioon purunemise hetkel üle 2 mm (8,43 mm). Samas kõigil põhupaneeli postidel oli z-teljeline deformatsioon suurem kui 2 mm. Esimesel põhupaneelil oli parempoolse posti juures siire 4,64 mm, teisel põhupaneelil oli siire vasakpoolse posti juures 6,01 mm ja kolmandal paneelil parempoolse posti juures 6,24 mm.

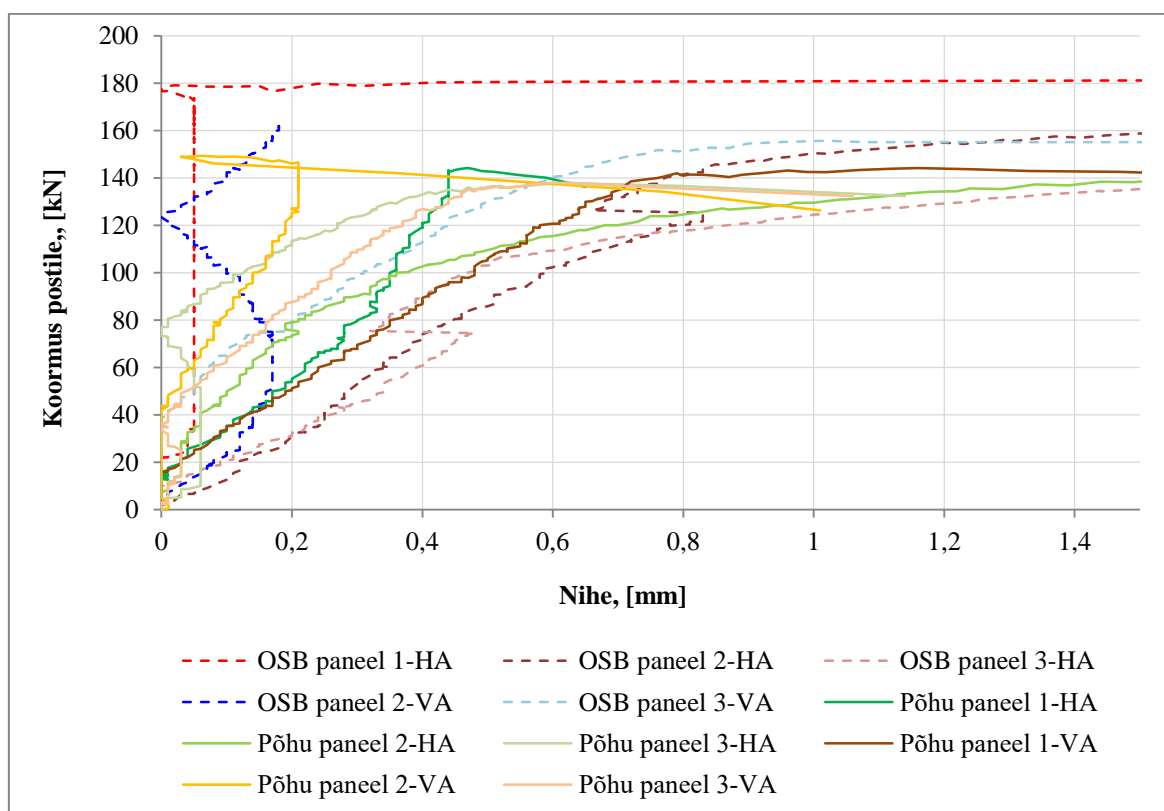
3.5. OSB-, põhuplaadi ja puitpostide komposiitkäitumise analüüs

Komposiitmaterjale ehk komposiite valmistatakse kombineerides omavahel kahte või enam materjali, millel on sageli väga erinevad omadused. See kooslus annab enamasti uute unikaalsete omadustega materjali. (Komposiitmaterjalid, 2019)

Paneelide komposiitkäitumine sõltub suurel määral materjale ühendavatest kinnititest. Mida tugevama kinnituse suudavad kinnitused luua, seda väiksem on materjalide omavaheline liikumine ja seega ka täiuslikum konstruktsiooni komposiitkäitumine.

Sõrestikpostide ja OSB- ja põhuplaatide omavahelist nihkumist mõõdeti tehnilistel põhjustel kahe anduriga, kõikidel paneelidel vasaku posti $\frac{1}{2}$ kõrguselt. Üks anduritest mõõtis vertikaalset nihet ja teine horisontaalset nihet. Andurid märgistati vastavalt:

- VA – mõõtis vertikaalset nihkumist (y- telje sihis)
- HA – mõõtis horisontaalset nihkumist (x- telje sihis)



Joonis 49. Paneelide sõrestik posti ja plaadi vaheline nihkumine horisontaal ja vertikaal suunas.

Joonisel 46 on näha et kuni 75 kN on vertikaalne ja horisontaalne nihe kõikidel paneelide komposiit elementidel väiksem kui 0,5 mm. 100 kN juures on teistest paneelidest suurem komposiitne nihe OSB paneelil 2 ja seda horisontaal suunal. Üldiselt ei eristu kummagi komposiit paneeli nihked üksteisest, nihked on suhteliselt sarnased. Kõige rohkem eristub kogumist OSB paneeli 1 horisontaalne nihe, seda võib seletada teistest paneelidest tugevamate sõrestikpostidega.

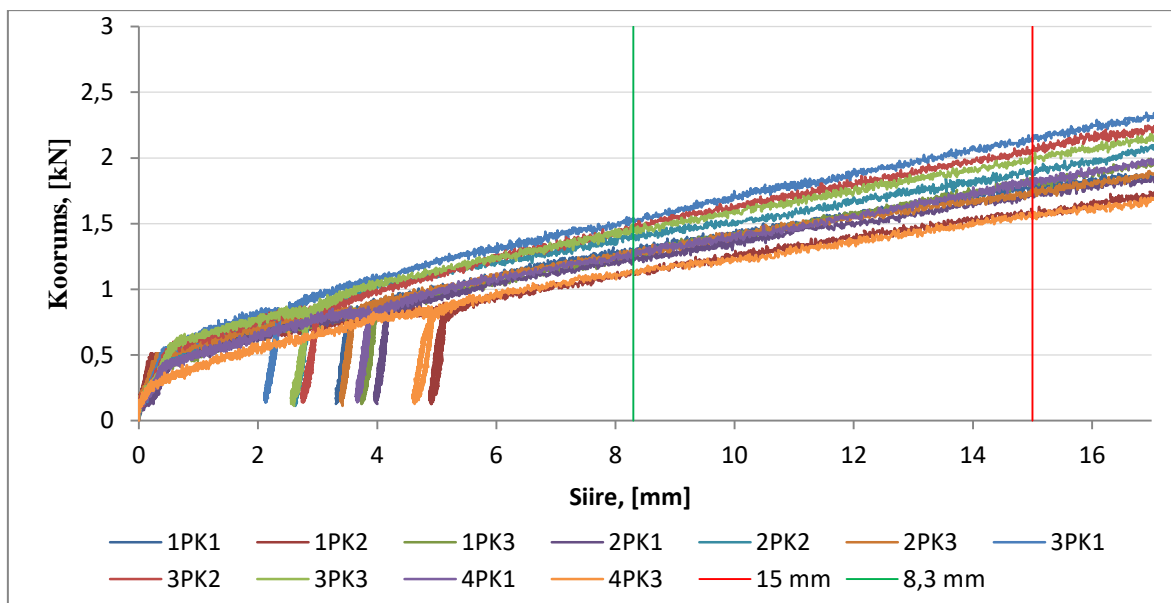
3.6. Ühelõikelise kruvi liite kandevõime analüüs

Katsete käigus uuriti põhuplaadi ja puitkarkassi ühelõikelise kruvi liite tugevust. Katsed viidi läbi 24 põhuplaadist lõigatud katsekehadega, mis olid kinnitatud puidukruviga 6,0 x 120 mm puitklotsi külge mõõtudega 45 x 145 x 400 mm. Põhuplaatidest lõigati vastavalt lõike plaanile välja katsekehad piki plaati ja risti plaati, mõõtudega 200 x 350 x 58 mm. Katsekehade lõike skeem on toodud lisas (Lisa 1). Kokku viidi läbi 24 katset ja katsete läbiviimiseks kasutati standardis EN-EVS 26891:1999 väljatoodud metoodikat.

3.6.1. Ühelõikelise kruvi liite analüüs risti plaati lõigatud katsekehadega

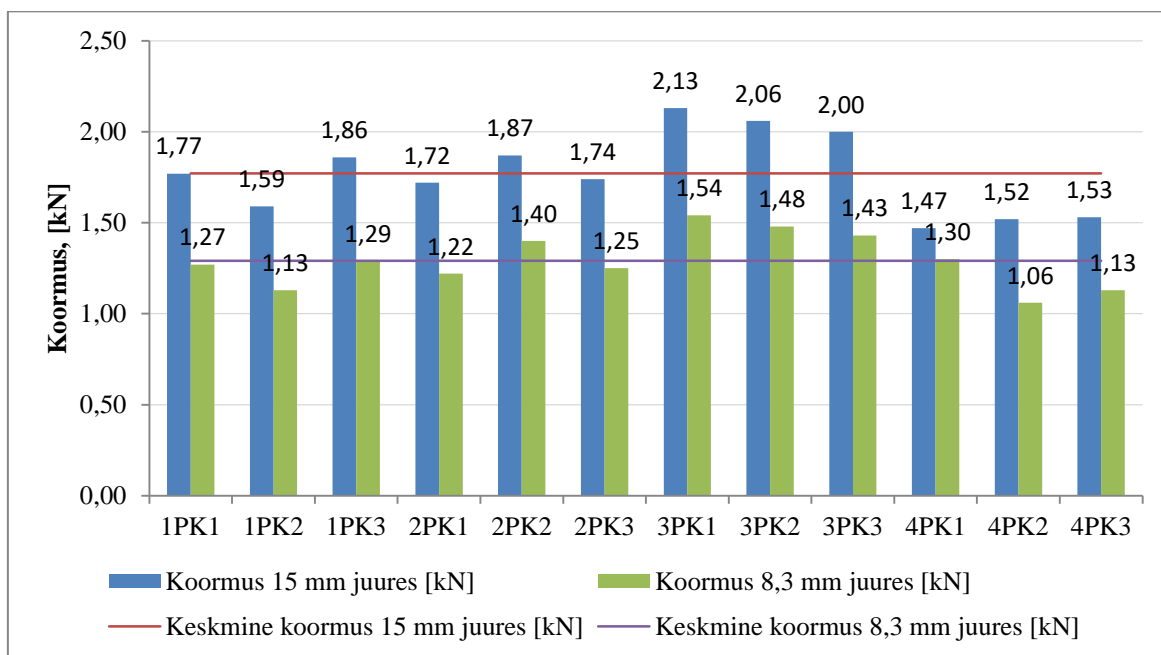
Ristiplaati lõigatud katsekehadega viidi läbi 12 katset. Ristiplaati lõigatud katsekehades asetsevad põhukiud piki suunas ehk siis samas suunas katsekehale rakendatud jõuga. Katsetulemuste andmed (Lisa 10 Tabelis L10.3).

Joonis 50 graafikul on välja toodud katsekehadele mõjuvast jõust tekkiv siire ja kruvi kandevõime. Graafikult on näha, et kandevõime kasvab lineaarselt ja on kõigil katsetel suhteliselt sarnane.



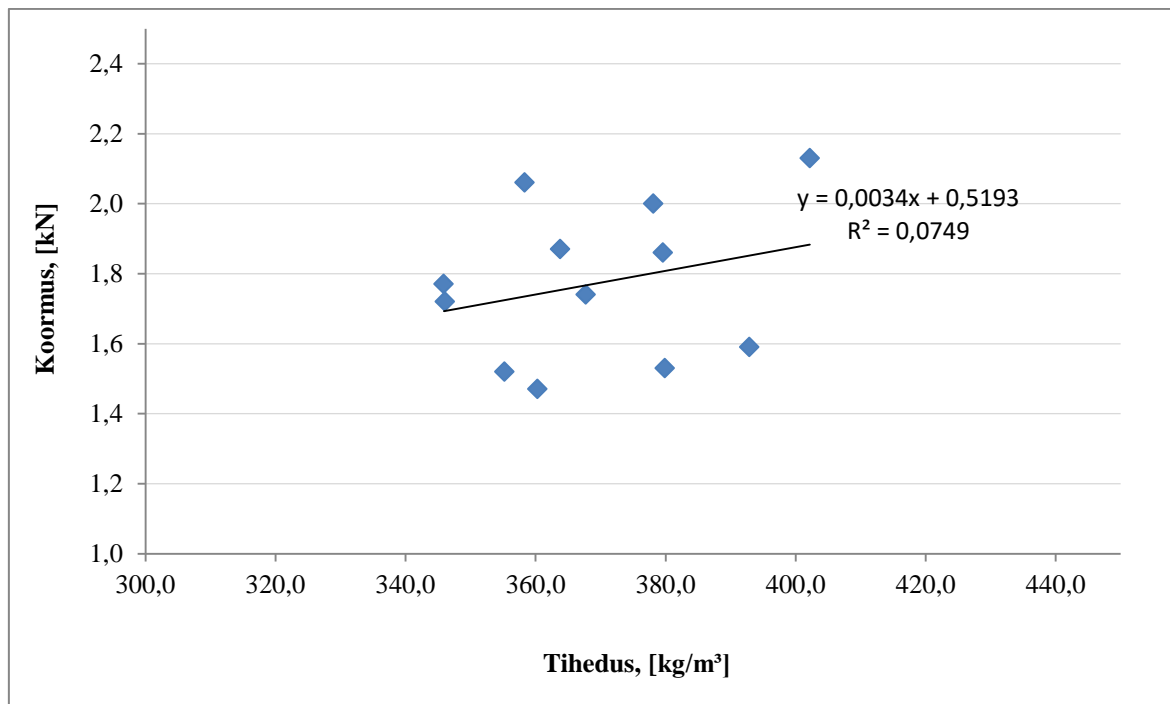
Joonis 50. Risti plaati (piki kiudu) ühelõikelise kruvi liite katse tulemused

Joonis 51 on välja toodud kõigi katseseeria katsekehade tulemused standardi EN-EVS 26891:1999 järgi lubatud maksimaalse 15 mm siirde juures ja paneeli postide maksimaalse lubatud siirde (8,3 mm) juures saadud väärtused.



Joonis 51. Risti plaati lõigatud katsekehade kruvi ühelõikelise liitekandevõime väärtuste tulpdiaagramm 15 mm siirde ja 8,3 mm siirde korral

Minimaalseks mõõdetud tulemuseks oli 1,47 kN ja maksimaalseks tulemuseks oli 2,13 kN, mis teeb maksimaalse ja minimaalse tulemuse vaheks 0,66 kN. See teeb tulemuste kõikumiseks $\pm 18,3$ %, mis on küllalt suur kõikumine. Katsete keskmiseks tulemuseks saadi 1,77 kN ja see oli piki plaadi katsetega võrreldes 26 % väiksem tulemus. Katsete tulemus 8,3 mm juures oli 1,29 kN. Seose leidmiseks plaadi tiheduse ja liitekandevõime vahel kui survejõu suund on paralleelne põhu kiududega, koostati joonis (Joonis 52), kus iga punkt tähistab katsekeha tiheduse ja saavutatud maksimaalse jõu vahelist seost.



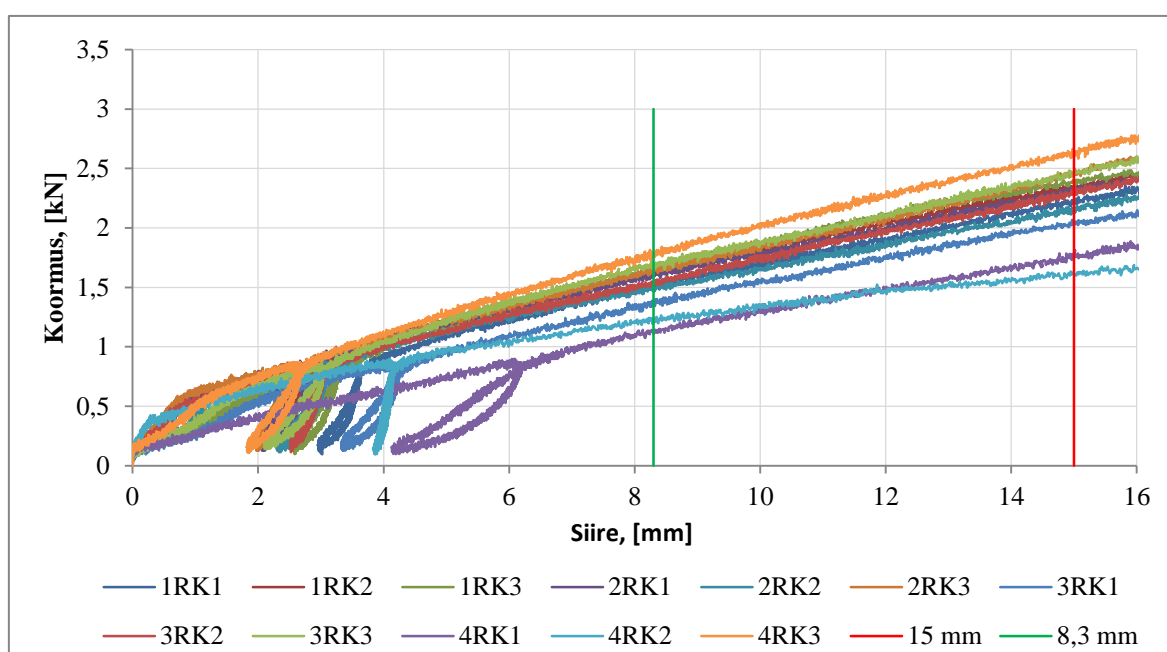
Joonis 52. Kruvi ühelõikelise liite kandevõime ja põhuplaadi tiheduse vaheline seos risti plaati (pikikiudu) katsekehadega.

Jooniselt 52 on näha, et põhuplaadi tihedus on väga nõrgalt seotud kruvi kandevõimega. Tehtud katsete põhjal saab järeldada, et ilmselt on olulisem kattepaberi tugevus plaadi pinnal, sest peale paberi purunemist libiseb kruvi koos seibiga põhu kiudude vahelt läbi.

3.6.2. Ühelõikelise kruvi liite katse analüüs piki plaati lõigatud katsekehadega

Piki plaati lõigatud katsekehadega viidi läbi 12 katset. Piki plaati lõigatud katsekehades asetsesid põhukiud risti suunas plaadi pikema küljega ehk siis ka risti suunas katsekehale rakendatud jõuga. Katsetulemuste andmed on esitatud lisas (Lisa 10 Tabel L10.4).

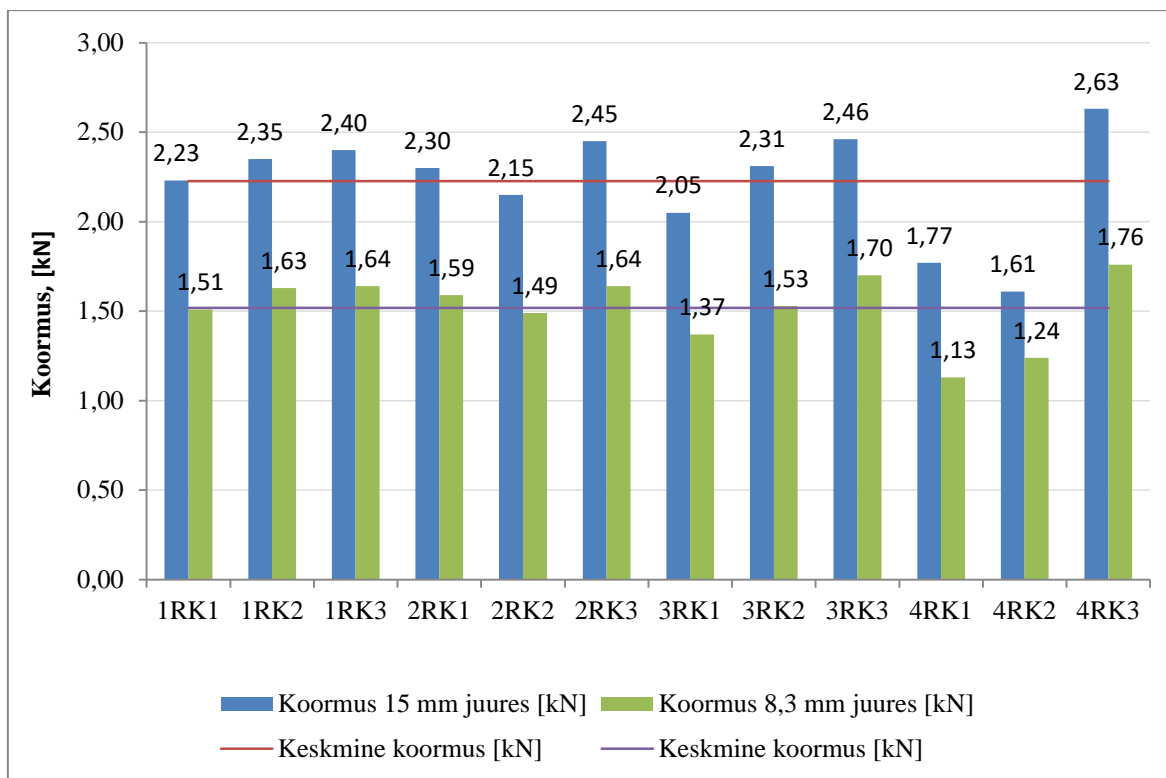
Piki plaati lõigatud katsekehadega tehtud katsed andsid sarnaselt risti plaati tehtud katsekehadega sarnaselt ühtlased tulemused. Erandiks oli katsekehad 4RK1 ja 4RK2, mille kruvi kandevõime oli vastavalt 20,6% ja 27,8% alla keskmise tulemuse.



Joonis 53. Piki plaati (risti kiudu) ühelõikelise kruvi liite katse tulemused.

Sarnaselt risti plaadi katsega kasvas ka siin kandevõime lineaarselt ja jätkas kasvamist ka peale standardi EN-EVS 26891:1999 lubatud maksimaalse 15 mm siirde saavutamist.

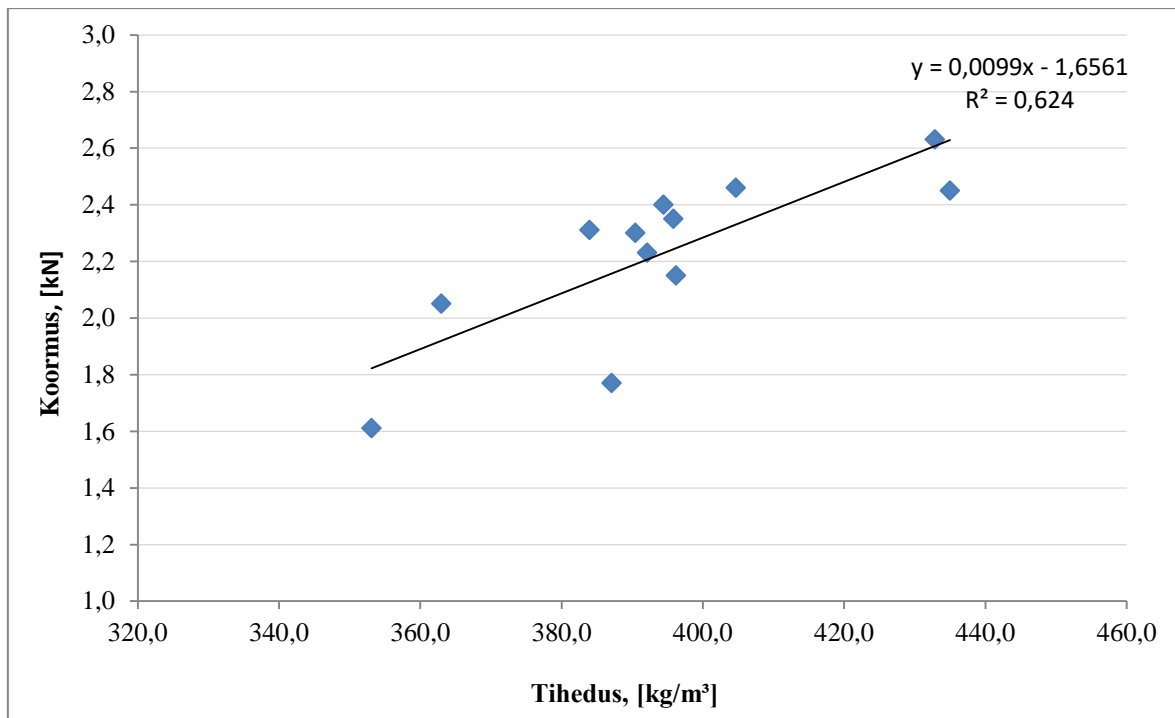
Joonisel 54 on välja toodud kõigi katseseeria katsekehade tulemused standardi EN-EVS 26891:1999 järgi lubatud maksimaalse 15 mm siirde juures ja paneeli postide maksimaalse lubatud siirde (8,3 mm) juures saadud väärtused.



Joonis 54. Piki plaati lõigatud katsekehade kruvi ühelõikelise liitekandevõime väärtuste tulpdiaagramm 15 mm siirde ja 8,3 mm siirde korral.

Katseseeria keskmiseks tulemuseks mõõdeti 2,23 kN 15 mm juures ja 1,52 kN 8,3 mm juures. Minimaalne kandevõime tulemus 15 mm juures oli 1,61 kN ja maksimaalne 2,63 kN. See teeb erinevuseks 1,02 kN, mis on suhteliselt suur erinevus. Võrreldes katsete keskmise tulemusega on erinevus -27,8% ja +17,9 %.

Sarnaselt risti plaati lõigatud katsekehadega koostati joonis, et uurida tiheduse ja kandevõime seost.



Joonis 55. Kruvi ühelõikelise liite kandevõime ja põhuplaadi tiheduse vaheline seos piki plaati lõigatud katsekehadega

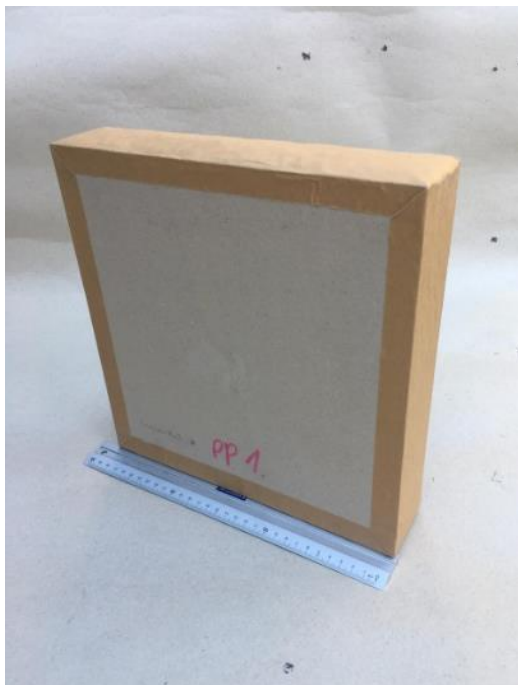
Joonisel 55 on näha, et põhuplaadi tiheduse ja kruvi lõikekandevõime vahel on keskmine seos. Katseseeria nõrgima tulemuse teinud katsekehal 4RK2 oli ka kõige väiksem tihedus. Tehtud katsete põhjal saab järeldada, et peale paberi purunemist töötab seib konksuna ja haagib enda taha põhukiud. Mida tihedam plaat seda rohkem põhukiude seibi taha haagitakse. Selle tõttu on ilmselt ka kruvi ühelõikelise liite kandevõime 26 % suurem võrreldes risti plaati katsekehadega.

4. PÕHUPLAADI SOOJUSERIJUHTIVUSE MÄÄRAMINE

Katsete eesmärk oli uurida Ekopanely põhuplaatide soojustehnilisi omadusi ja neid võrrelda tehase poolt avaldatud andmetega ning teiste looduslike soojustusmaterjalidega nagu kanepivilla- ja puitvillaplaatidega.

4.1. Katsekehad

Soojuserijuhtivuse määramiseks valmistati viis katsekeha, mis lõigati viiest erinevast põhuplaadist koos painde ja survekatsekehadega. Katsekehade mõõdud määras katseseina ava suurus mille mõõdud olid 300 x 300 x 100 mm. Seega, et katsekehad sinna mahuksid lõigati katsekehad mõõtudega 295 x 295 x 58 mm. Kõik katsekeha servad teibiti Tesa 100 mm isekleepuva paberteibiga, et vältida põhu välja kukkumist katsekehast. Väljalõigatud ja teibitud külgedega katsekeha on näidatud joonisel 56.



Joonis 56. Katsekeha soojusjuhtivuse mõõtmiseks

4.2. Katseseadmed

Põhuplaatide katsekehade soojuserijuhtivuse määramiseks kasutati kliimaseadet Feutron 3007-5, soojusvooplaati ja termopaare, mis mõõtsid katsekehade pinnatemperatuure. Andmed salvestati digitaalse andmesalvestajaga Almemo 5690-2 (Joonis 21).

Kliimaseade Feutron 3007-5 (Joonis 57) koosneb kliimakambrist (maht 252 dm³), külmaagregaadist ja sisekliima reguleerimise automaatsüsteemist. Kamber on ehitatud roostevabast terasest ja on isoleeritud soojustusmaterjaliga. Kliimakambris tekitatakse õhuringlus küttekeha, õhulööri ja külmaine vahel ventilaatoriga. Selline õhu liikumine tagab kliimaseadme katsekambris ühtlase temperatuuri ja õhuniiskuse. Seadme agregaatideks on vesijahutusega kompressor, õhkjahutusega kompressor, kuivatid ja õhuniisutid. Kliimakambris on võimalik saavutada temperatuure vahemikus -32...+30 °C ja suhtelist õhuniiskust vahemikus 10...98 %. (Miljan M.-J., 2007)



Joonis 57. Kliimaseade Feutron 3007-5 koos katseseinaga

Kliimaseadme töörežiime juhitakse programmeeritava automaatjuhtimissüsteemiga ja mõõtmistulemused salvestatakse digitaalsalvestussüsteemiga Almemo 5690-2 (Joonis 21). Juhtimissüsteem on ühendatud arvutiga ning selle abil on võimalik anda katsekambrile katse läbiviimiseks vajalik temperatuur- ja õhuniiskuse tase. Samuti saab süsteemi abil

juhtida automaatselt niisutuse, kütte ja jahutuse seadmeid või kondensagregaati, et tagada kliimakambri sobiv töörežiim. Automaatikaga saab kliimaseadmele määrata katseteks vajalikud väliskeskkonna tingimused eelpool mainitud vahemikes. Suhteline õhuniiskus on automaatikaga reguleeritav ainult positiivsete °C juures. Kliimakarbiga on võimalik teha ka kuiva õhku niiskuse külmutamise meetodil. (Miljan M.-J., 2007)

Katsete läbiviimiseks kasutati soojusvooplaati Type 119 (FQA019C) mõõduga 250x250x1,5 mm (Joonis 58), mille mõõtepiirkond on 180 x 180 mm. Plaat koosneb paljudest plaadi vastaskülgedel asetsevatest termopaaridest, mis paiknevad loogeliselt üle plaadi pinna. Tagades sellega piisava koguse mõõtmistsoone. Plaat töötab soojustakistina ja mõõdab soojusvoogu. Kogu plaadi paksuse ulatuses areneb temperatuurigradient proportsionaalselt soojusvoo tihedusega. Tulemuseks saadud soojusvoog on kõigi plaadil asuvate termopaaride keskmine soojusvoog. Soojusvooplaat talub kuni 80 °C kuumust ja selle mõõtmisviga on 25 °C juures 5 %. (Miljan M.-J., 2007)



Joonis 58. Soojusvoo plaat koos ühenduspistikuga vahetult enne paigaldust vahtpolüstereenist katseseinale.

Katsekeha pinnalt temperatuuri mõõtmiseks kasutati NiCr-Ni termopaare (ZA 9020-FS) (**Joonis 59**). NiCr-Ni termopaar, koosneb kahest erinevast sulamist kokku joodetud 0,2 mm paksusest traatidest. Termopaar võimaldab mõõta temperatuuri vahemikus -25...+400

°C. Temperatuuri mõõtmine toimub termoelektrilise efekti abil. Mõõdetakse termoelektrilist pinget, mille suurus sõltub temperatuuri erinevusest ühendusseadme ja mõõtepunkti vahel. Termopaar ühendatakse ühenduspistiku abil andmesalvestajaga Almemo 5690-2. (Miljan M.-J., 2007).



Joonis 59. Termopaar koos ühenduspistikuga. (Pappel, 2017)

Õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmiseks kliimakarbis kasutati mõõtesondi HygroClip S (**Joonis 60**). Seadmega on võimalik mõõta õhuniiskust vahemikus 0...100% ja temperatuuri -40...+85°C (Miljan M.-J., 2007).



Joonis 60. Mõõtesond HygroClip S kliimakambris (Pappel, 2017)

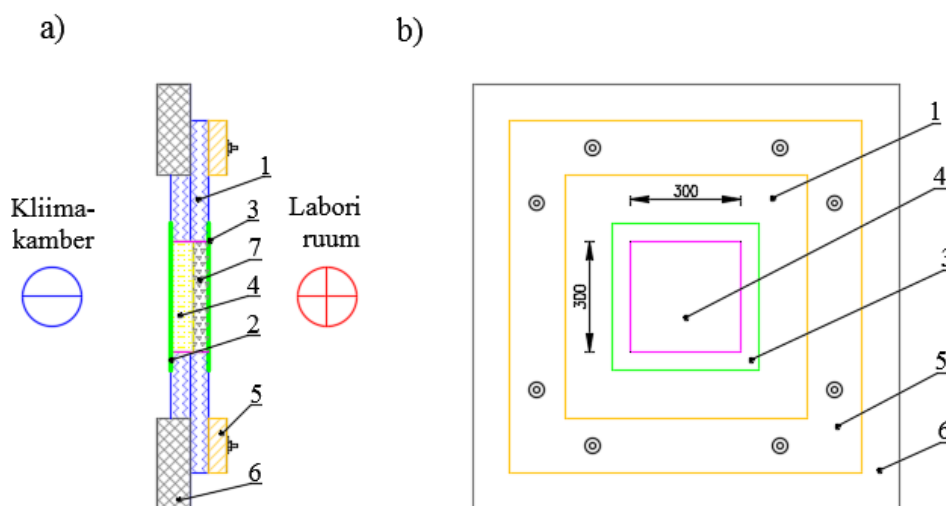
Mõõtmistulemuste andmed salvestati digitaalse andmesalvestajaga Almemo 5690-2 (**Joonis 21**) intervalliga 1 minut. Andmesalvestajaga ühendati soojusvooplaat ja temperatuuri andurid et mõõta järgmised parameetrid:

- katsekeha soojema pinna temperatuur [$^{\circ}\text{C}$];
- katsekeha külmema pinna temperatuur [$^{\circ}\text{C}$];
- soojusvoog q läbi termiliselt homogeense katsekeha [W/m^2].

Lisaks soojusjuhtivuse määramisele oli vaja määrata katsekehade tihedus ja niiskussisaldus. Selleks kasutati digitaalset nihkekaliibrit Scala mõõtevahemikuga 0 – 300 mm, nihkkaliiberi mõõtetäpsus on 0,01 mm (Joonis 9). Niiskussisalduse mõõtmiseks kasutati digitaalset kaalu Kern EW 4200-2NM ($e=0,1$ g ja $d=0,01$ g) (Joonis 10) ja kuivatuskappi Memmert , kus kuivatustemperatuur oli 105°C .

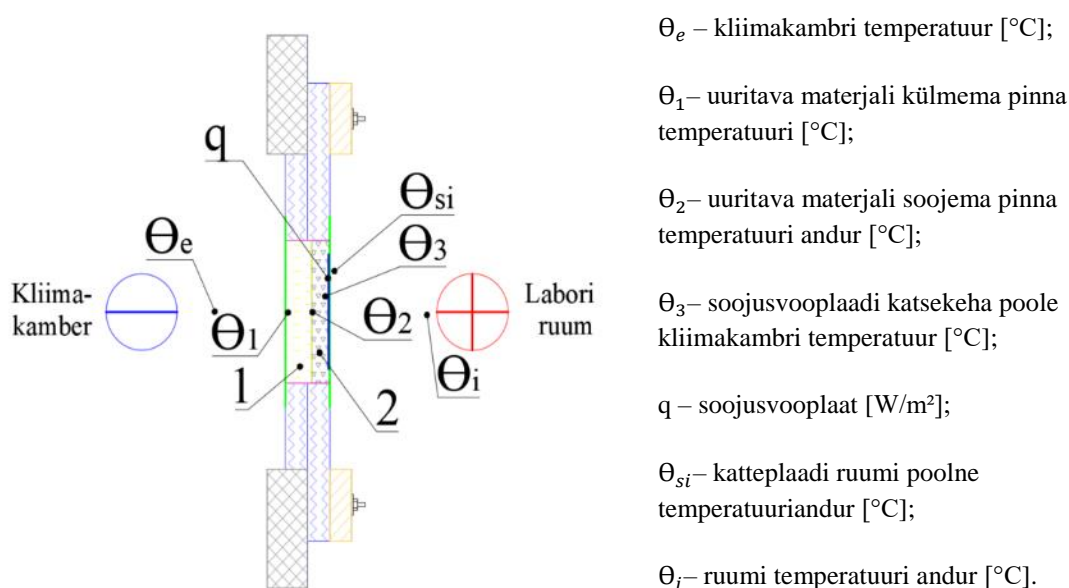
4.3. Katsetoodika

Soojusjuhtivuse mõõtmiseks paigutati katsekehad kliimakambri Feutron 3007-5 katseseina avasse. Katsesein on tehtud kahest 50 mm paksusest vahtpolüstereenplaadist, mille keskosa sisse on lõigatud ava katsekehade jaoks mõõduga 300 x 300 mm. Katseseina skeem on välja toodud joonisel (Joonis 61).



Joonis 61. Katseseina lõige a) ja katseseina vaade ruumi poolt (b): 1 – vahtpolüstereen 2x50 mm; 2 – jäik seinaplaat; 3 – lahtivõetav seinaplaat; 4 – uuritav katsekeha; 5 – katseseina elemendi kinnitusraam; 6 – kliimakambri sein; 7 – täiteks kasutatud tselluvill. (Anslan, 2015)

Katseseina paigutatud katsekehade paksuseks oli ca 60 mm, sellepärast täideti ülejäänud 40 mm tselluvillaga, katseseina laboriruumi poolsest küljest. Tselluvillaga tühimiku täitmine on oluline, et ei tekiks lahivõetava seinaplaadi ja katsekeha vahel õhkvahet. Soojusvooplaat on paigutatud ruumi poolsele katseseina küljele ja kliimakambri poolne külg on suletud plaadiga katsekeha ees. Katsesein kinnitati kliimakambri ava ette puidust raami abil, mis omakorda kinnitati mutritega kambri seinaküljes olevate poltide külge. Joonisel 62 on väljatoodud soojusjuhtivuse mõõtmise skeem ja andurite asukohad.



Joonis 62. Andurite asukohad katsekeha soojuserijuhtivuse mõõtmise katsel:

1 - katsekeha 295x295x58 mm; 2 – tselluvill.

Katsete mõõtmine toimus iga katsekehaga 1 – 2 päeva. Kliimakamber oli seatud temperatuurile - 15 $^{\circ}\text{C}$ ja labori ruumi temperatuur oli vahemikus 19...22 $^{\circ}\text{C}$.

Mõõtmistulemuste põhjal arvutati katsekehade soojuserijuhtivus standarti EVS - EN ISO 7345:2006 valemi 5.1 järgi:

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{(\Theta_1 - \Theta_2)}, \quad (5.1)$$

kus λ – soojuserijuhtivus W/mK;

q – soojusvoog läbi katseseina W/m^2 ;
 d – katseseina paksus m ;
 θ_1 – katsekeha soojema pinna temperatuur $^{\circ}C$;
 θ_2 – katsekeha külmema pinna temperatuur $^{\circ}C$.

Soojusjuhtivuse keskmise väärtuse leitakse statistilise keskmise valemiga 5.2 (EVS-EN ISO 10456:2008)

$$\lambda_{mean} = \frac{\sum \Lambda_i}{n}, \quad (5.2)$$

kus λ_{mean} – materjali keskmine soojuserijuhtivus W/mK ;
 $\sum \Lambda_i$ – materjali soojuserijuhtivuste summa W/mK ;
 n – mõõtmistulemuste arv

Temperatuur esmastes piirtingimustes (T_1) leiti valemiga 5.3:

$$T_1 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad (5.3)$$

kus θ_1 – katsekeha soojema pinna temperatuur $^{\circ}C$;
 θ_2 – katsekeha külmema pinna temperatuur $^{\circ}C$.

Temperatuuripõhine teisendustegur määratakse valemiga 5.4 (EVS-EN ISO 10456:2008):

$$F_T = e^{f_T(T_2 - T_1)}, \quad (5.4)$$

kus F_T – temperatuuripõhine teisendustegur $1/K$;
 f_T – temperatuuripõhine teisenduskoeffitsient $1/K$;
 T_1 – temperatuur esmastes piirtingimustes $^{\circ}C$;
 T_2 – temperatuur teisestes piirtingimustes ($10^{\circ}C / 23^{\circ}C$).

Deklareeritavale väärtusele teisendatud soojuserijuhtivus ($\lambda_{10^{\circ}C/23^{\circ}C}$) leiti valemiga 5.5 (EVS-EN ISO 10456:2008):

$$\lambda_{10^{\circ}C/23^{\circ}C} = \lambda * F_T \quad (5.5)$$

Standart hälve leiti valemiga 5.6 (EVS-EN ISO 10456:2008):

$$s_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum(\lambda_i + \lambda_{mean})^2}{(n-1)}}, \quad (5.6)$$

kus s_{λ} - soojuserijuhtivuse standardhälve;
 λ_i – soojuserijuhtivuse mõõtetulemus W/mK.

Nimiväärtus peab vastama kvantiilile 90%, usaldusnivool 90%. Selle ühepoolse statistilise tolerantsivahemiku piirväärtus L_s leidmiseks kasutatakse järgmist statistilist valemit (EVS-EN ISO 10456:2008) (valem 5.7):

$$L_s = \lambda_{mean} + k * s_{\lambda}, \quad (5.7)$$

kus k – tegur ühepoolse tolerantsi vahemiku leidmiseks. Viie katse korral on teguri väärtuseks 2,74.

4.4. Katsete analüüs

Põhuplaatide katsekehade mõõtmistulemused on välja toodud lisas 11. Antud graafikutel on esitatud kõigi viie katsekeha uuritud temperatuuri muutused, alates kliimakambri seest kuni labori ruumi temperatuurini ja soojusvoo näidud katseaja jooksul. Graafikute alusel leiti soojusvoo stabiilsed piirkonnad ja selle piirkonna andmete järgi arvutati soojuserijuhtivus valemi 5.1 järgi igal katsekehal.

Leitud soojuserijuhtivuse väärtused teisendati standarti EVS-EN ISO 10456:2008 järgi deklareeritavate soojusväärtusteni referentstemperatuuridele 10 °C ja 23 °C. Teisendamine tehti ainult temperatuuripõhiselt ja ei kasutatud niiskus- ja vanusepõhist teisendamist. Sammuti leiti mõõtmistulemuste standardhälbed valemi 5.6 järgi ja teisendatud soojuserijuhtivustele on liidetud tolerantsivahemike piirväärtused kasutades valemit 5.7. Vastavalt standardile ümardati kõik leitud soojuserijuhtivuse tulemused kolme tüvenumbrini.

Soojuserijuhtivuse arvutamiseks kasutati kõigi katsekehade puhul mõõtetulemusi, mis saadi soojusvoo stabiilsest vahemikust. Kõigi katsekehade mõõtmise andmed on esitatud lisas (Lisa 11).

Tabel L11.1 ja L11.2). Tabelite põhjal on koostatud tabel 6, mis annab ülevaate uuritud katsekehade soojuseriituvusest.

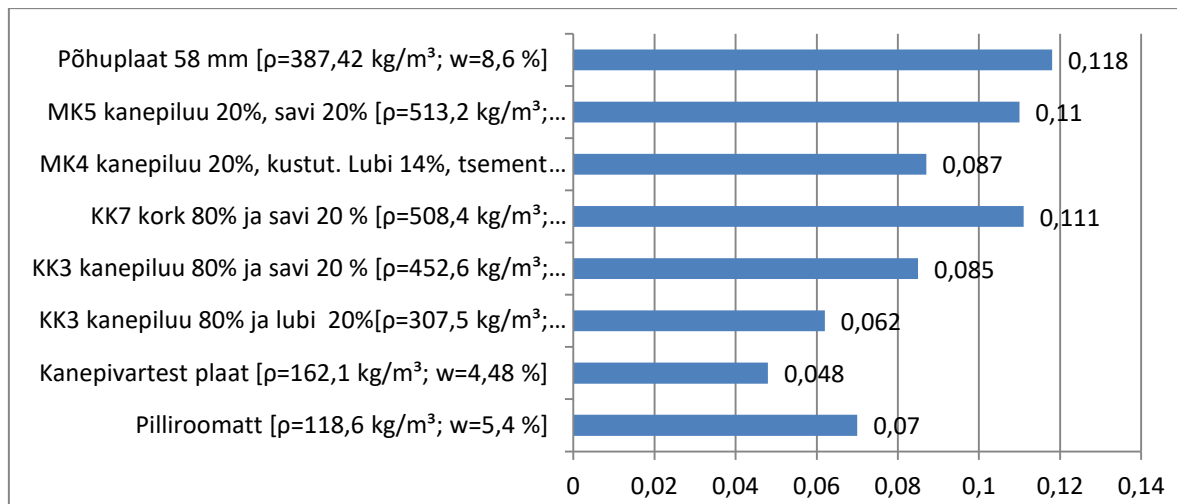
Tabel 6. Põhuplaatide katsekehade omadused

Katsekeha Nr	Tihedus	Veesisaldus	Keskmised soojuseriituvused [W/mK]		
	kg/m ³	%	λ	λ 10 °C	λ 23 °C
PP-1	393,58	8,98	0,092	0,093	0,099
PP-2	426,24	8,96	0,104	0,106	0,113
PP-3	403,43	9,20	0,096	0,097	0,103
PP-4	334,76	7,82	0,081	0,082	0,087
PP-5	379,11	8,32	0,093	0,094	0,100
Keskmine λ	387,42	8,66	0,093	0,095	0,101
		λ_d	0,116	0,118	0,126

Kui võrrelda saadud soojusjuhtivuse tulemust tehase poolt antud väärtusega, mis on 0,099 [W/(m·K)] (Ekopanely, 2018), siis läbiviidud katsete tulemused olid natuke suuremad. Katsete keskmine tulemus oli 19% suurem tehase antud väärtusest. Katsetulemuste suur erinevus, võrreldes tehase tulemusega, võis olla tingitud katsete vähesest arvust ja katsekehade tiheduse suurest varieerumisest.

Katsete tulemusi võrreldi Maaülikoolis tehtud varasemates uurimistöodes tehtud looduslike materjalide soojusjuhtivuse katse tulemustega. Andmed olid valitud põhuplaadi omadustega (tihedus, kujupüsivus) sarnaste materjalide kohta.

Parema ülevaate saamiseks võrdluses teiste looduslike ehitusmaterjalide soojuseriituvustega on koostatud joonis (Joonis 63).



Joonis 63. Eelnevalt võrdluseks välja toodud looduslike soojustusmaterjalide soojuserijuhtivus stabiilses olukorras määratud EMÜ maaehituse osakonna ehitusfüüsika laboris (materjali tihedus kg/m³, w-materjali veesisaldus %). (Miljan, 2012; Anslan, 2015; Pappel, 2017)

Kirsto Anslan uuris oma magistritöös „*Tööstuskanepi omaduste uurimine ja kasutusvõimalused ehituses*“ erinevaid kanepist soojustussegusid. Põhuplaadiga sarnaste omadustega olid katsekehad MK3 ja MK 6. Esimene katsekeha oli valmistatud kanepiluu ja lubja segust, tihedus oli $\rho=307,5 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,062 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ ja teine katsekeha oli valmistati kanepiluust ja savist, tihedus oli $\rho=452,6 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,085 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$. (Anslan, 2015) Mõlema katsekeha näitajad olid natuke paremad kui põhuplaadi samad näitajad. Anslan ei arvestatud oma töös standardhälvet ega tegurit L_s .

Anslani tööga sarnaselt uuris ka Denis Pappel oma magistritöös „*Tööstuslikust kanepist soojustusisolatsioonimaterjalide omaduste uurimine*“ erinevaid kanepist valmistatud kergbetooni segusid. Kõige sarnasemate omadustega põhuplaadile oli katsekeha MK 4, mis oli valmistatud kanepiluust, kustutatud lubjast ja tsemendist. Katsekeha tihedus oli $\rho=413,2 \text{ kg/m}^3$ ja soojuserijuhtivus $\lambda = 0,087 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ ja katsekeha MK5. Mis oli valmistatud kanepiluust ja savist, katsekeha tihedus oli $\rho=513,2 \text{ kg/m}^3$ ja soojuserijuhtivus $\lambda = 0,110 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$. (Pappel, 2017)

Nende tulemuste põhjal võib järeldada, et põhuplaat on oma soojuserijuhtivuse poolest võrreldav kanepiluust valmistatud plokkidega.

KOKKUVÕTE

Põhk on kiirelt taastuv loodusressurss, mis jääb üle teravilja koristusel ja tänu headele mehaanilis – füüsikalisele omadustele kogub populaarsust ehitusmaterjalina. Käesolev magistritöö keskendub Tšehhi ettevõtte Ekopanely poolt toodetavate põhuplaatide katselisele uurimisele, et seeläbi laiendada põhuplaatide kasutusvõimalusi ehituses.

Magistritöös uuriti põhuplaatide sobivust konstruktsiooni elemendina, selleks uuriti katsekehade: painde- ja survetugevust, kruvi kinnitus tugevust lõikele põhuplaadi ja puitkarkassi vahel. Iga katse seeria läbiviimiseks valmistati 24 katsekeha, mis lõigati välja 12 põhuplaadist vastavalt standardile EVS-EN 789. Kuna põhu kiud asetsevad toodetavates põhuplaatides orienteeritult, siis lõigati katsekehad vastavalt standarti järgi nii, et igas katse seerias, 12 katsekehas asetsesid põhu kiud pikiplaati ja 12 katsekehas risti plaati.

Töö üheks peamiseks eesmärgiks oli välja selgitada kui palju suurendavad põhuplaadid puitkarkassi postide nõrkekandevõimet. Katsete läbiviimiseks koostati katsemetoodika katsekehade koormamiseks ja siirete mõõtmiseks. Vertikaalse survega koormati viite põhuplaat – puitpostidest seinapaneeli ja võrdlusmomendi saamise eesmärgil viidi sama metoodika alusel läbi katsed ka kolme OSB plaat – puitpostidest seinapaneelidega.

Lisaks mehaaniliste omaduste uurimisele mõõdeti viiest erinevast plaadist väljalõigatud katsekehadega põhuplaadi soojuseri juhtivust.

Painde- ja survekatsed katsekehadega teostati Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi puidulaboris universaalse elektrimehaanilise katsemasinaga INSTRON 3369.

Paindekatsete tulemusena selgus, et paindetugevus põhuplaadil risti plaati on tugevam kui piki plaati. Katsete tulemusena saadi plaadi risti suunas keskmiseks paindetugevuseks 2,19 N/mm² ja pikiplaati keskmiseks paindetugevuseks 1,65 N/mm². Katsete tulemuste põhjal saab järeldada, et plaat on risti suunas ligemale 25 % tugevam kui piki suunas. Katsete käigus selgus, et väga tähtsat osa mängib plaatide katteks kasutatud papi kvaliteet ja seal olevad defektid. Lisaks võrreldi katsetulemusi *Praha Timber Research and Development Institute* poolt läbiviidud katse tulemustega, kus saadi pikiplaati

paindetugevuseks 1,46 N/mm² ja ristiplaati 1,72 N/mm². Mõlemad näitajad on väiksemad kui käesolevas töös saadud tulemused. Erinevus pikiplaati oli 13% ja ristiplaati 28%.

Survekatsete tulemused pikiplaati lõigatud katsekehadega erinesid üksteisest päris suurel määral. Minimaalne mõõdetud survetugevus oli 0,51 N/mm² ja maksimaalne mõõdetud tulemus oli 1,51 N/mm², mis teeb erinevuseks 66,3 %. Ristiplaati mõõdetud minimaalne survetugevus oli 0,62 N/mm² ja maksimaalne mõõdetud tulemus oli 1,29 N/mm², mis teeb ülemise ja alumise väärtuse erinevuseks 48 %. Risti plaati lõigatud katsekehade tulemused olid ühtlasemad kui pikiplaati lõigatud katsekehadel. Võrreldes piki- ja ristiplaadist lõigatud katsekehade keskmisi survetugevuse väärtusi, siis oli ristiplaati lõigatud katsekehade keskmine väärtus suurem. Ristiplaati keskmine survetugevus oli 0,86 N/mm² ja pikiplaati 0,79 N/mm², mis teeb erinevuseks 9 %.

Põhu- ja OSB plaatidest ja sõrestikpostidest seinapaneelide nõtkete katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli ehituskonstruksioonide laboris olevale jõuseinale paigaldatud katseseadme abil. Algselt mõõdeti kõigi kasutatud vertikaalsete puitpostide nõtkekandevõimed, et leida raamide jaoks võimalikult ühtlast survet taluvad postid. Seejärel mõõdeti paneelides kasutatava puitraami postide nõtkete tugevust ilma põhuplaadita ja siis korrati sama katset koos raamile kinnitatud põhuplaadiga. Raamidele avaldati vertikaalset survet kuni saavutati vähemalt ühe raami posti lubatud 8,3 mm siire, kokku oli ettevalmistatud viis katset. Algne katseskeem nägi ette horisontaalsete vööde kasutamist puitraamil, mis aga ei andnud soovitud tulemust, kuna põhupaneeli katsel toimus vertikaalsete postide muljumine horisontaalsetesse vöödesse enne kui postid saavutasid maksimaalse lubatud siirde. Selle tõttu muudeti katse meetodikat ja puitraamilt eemaldati horisontaalsed vööd. Algse katseskeemi järgi tehti kaks katset ja muudetud skeemi järgi kolm katset.

Algse katseskeemi katsete tulemusena, suurenes puitpostide kandevõime esimesel paneelil 3,8 korda ja teisel paneelil 4,9 korda. Kuna paneelid kujutasid põhimõtteliselt pikka ja piisavalt saledat varrast, siis toimus suurem väljanõtkumine paneelide horisontaalse pinnaga risti suunas.

Ilma horisontaalsete vöödeta oli esimesel ja kolmandal paneelil vahetult enne kandepostide purunemist suurem nõtkete plaadi vertikaalse pinnaga risti suunas. Ainult teisel paneelil toimus lubatud suurim nõtkete vasakpoolses postis horisontaalse pinnaga samas suunas. Kolme katse keskmisena toimus paneeli postide purunemine lubatud suurim siirde 8,3 mm ja koormuse 141,66 kN juures. Kusjuures esimesel ja kolmandal paneelil puit postid

lubatud suurimat siiret (8,3 mm) ei saavutanud, sest enne toimus vähemalt ühe posti purunemine. Raami postid ilma põhuplaadita saavutasid maksimaalse lubatud siirde 8,3 mm keskmiselt 34,33 kN juures. Puitraami ja põhupaneeli katsete andmete võrdluses suurendas põhuplaat puitpostide nõtketugevust esimeses katses 7 korda, teises 4 korda ja kolmandas 2,8 korda. Lisaks horisontaalsetele siiretele mõõdeti ka vertikaalseid siirdeid ja siin vähendas põhuplaat paneeli siirdeid peaaegu kaks korda.

Võrdlusmomendi saamiseks tehti eelkirjeldatud katseskeemi järgi kolm katset OSB plaatidest ja vertikaalsetest postidest paneelidega. Kolme paneeli keskmisena toimus paneelide purunemine või katse lõpetamine 164,12 kN juures ühe posti kohta. Katse tulemuste põhjal suurendasid OSB plaadid vertikaalset puitpostide nõtkekandevõimet esimesel paneelil 5,3 korda, teisel paneelil 6,7 korda ja kolmandal paneelil 6 korda.

Põhuplaatide ja OSB plaatide võrdluses saab öelda, et OSB plaadid suurendasid postide nõtkekandevõimet natuke rohkem kui põhuplaadid. Katsete käigus selgus, et põhupaneelid ei kaotanud peale posti(de) purunemist enda kandevõimet nii järsult kui seda tegid OSB paneelid. Töö autori arvates on see märkimisväärne eelis OSB plaatide ees.

Magistritöö ühe osana mõõdeti põhuplaadi ja puitkarkassi vahelist kruvi liitekandevõime tugevust. Katsed viidi läbi 24 katsekehaga, millest pooltel katsekehadel asusid põhu kiud risti- ja pooltel piki kruvi liikumise suunda.

Risti kiudu kruvi ühelõikelise liitekandevõime katseseeria keskmiseks tulemuseks mõõdeti 2,23 kN ja piki kiudu katsete keskmiseks tulemuseks saadi 1,77 kN ja see oli ristikiudu katsetega võrreldes 26 % väiksem tulemus.

Eesmärgiga, kas plaadi tihedus mõjutab kruvi kandevõimet, võrreldi katsekehade tihedust ja kruvide maksimaalset saavutatud jõudu paneeli postide 15 mm siirde juures. Võrdlusest selgus, et pikikiudu katsetel oli väga nõrk seos kruvi löike kandevõime ja tiheduse vahel. Selle põhjal järeldati, et plaadi kattepapi tugevus on olulisem kui plaadi tihedus, sest peale papi purunemist libises kruvi koos seibiga põhu kiudude vahelt läbi. Plaadi tihedus mängis suuremat rolli risti põhukiudu tehtud katsete juures. Vastavalt põhuplaadi tiheduse ja kruvi löike kandevõime vahel risti kiudu katsete analüüsi kohaselt oli andmetel keskmine seos. Saadud andmete põhjal saab järeldada, et peale paberi purunemist töötab seib konksuna ja haagib põhukiud enda taha. Mida tihedam plaat seda rohkem põhukiude seibi taha haagitakse. Siit on ka seletatav miks oli ristikiudu kruvi kandevõime suurem kui pikikiudu.

Magistritöö viimases osas mõõdeti põhuplaadi soojuserijuhtivust. Katse tulemusi võrreldi tootja andmetega ja varem Eesti Maaülikoolis sarnaste omadustega looduslike materjalide soojuserijuhtivustega. Katsed viidi läbi viie katsekehaga ja nende arvutuslik soojuserijuhtivuse tulemus saadi (10°C juures) $0,118\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, mis oli 19 % suurem tulemus kui tehase antud väärtus ($0,099\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Katsetulemuste suur erinevus võis olla tingitud katsete vähesest arvust ja katsekehade tiheduse suurest varieerumisest. Võrdlus tulemustes selgus, et põhuplaadi soojuserijuhtivus on sarnane kanepiluust ja kergbetoonist valmistatud plokkidega ja suurem kanepivartest- ja pilliroost valmistatud soojustusplaatidest.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et põhuplaat võiks olla puitkonstruktsioone tugevdavaks materjaliks analoogselt OSB plaadiga, lisaväärtusena on plaadil head soojusisolatsiooni omadused ja seda kõike tootmiseks vajava madala energia kuluga, võrreldes teiste samaväärsete tööstuslikult toodetud ehitusmaterjalidega.

Edasistes uurimustes võiks uurida põhuplaadi nihke- ja tõmbe tugevus, kruviliite kinnitustugevust tõmbele põhuplaadis ja soojuserijuhtivust erinevates niiskussisalduste tasemetel.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Alcorn, A. D.** (30.06.2010). Life Cycle Potential of Strawbale and Timber for Carbon Sequestration in House Construction. [on-line]
<http://www.claisse.info/2010%20papers/m23.pdf> (20.04.2019)
- Amazon Nails. (2001). Information Guide to Straw Bale Building – for self-builders and construction industry. 76 lk [on-line] <http://www.baubiologie.at/download/strawbaleguide.pdf>
- Anslan, K.** (2015). Tööstuskanepi omaduste uurimine ja kasutusvõimalused ehituses. Eesti Maaülikool. Tartu. 104 lk.
- Berge, B.** (2009). The Ecology of Building Materials. Oxford: Copyright © 2009. Elsevier Ltd. 447 lk.
- Dalmeijer, R.** (2005). Straw-bale Sound Isolation and Acoustics. The Last Straw. [on-line] <http://thelaststraw.org/strawbale-sound-isolation-acoustics> (05.05.2019)
- Ekopanely. <https://www.ekopanely.com> (2.10.2018)
- Ekopanely-brochure-EN. <https://www.scribd.com/doc/267286664/02-ekopanely-brochure-en> (2.10.2018)
- EVS-EN ISO 10456:2008. (2008). Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2. (2015). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 26891:1999. (1999). Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusedetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 310:2002. (2002). Puitplaadid. Paindeelastsusmooduli ja paindetugevuse määramine. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 322:2002. (2002). Puitplaadid. Niiskussisalduse määramine. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 325:2002. (2002). Puitplaadid. Katsekehade mõõtmete määramine. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 789:2004. (2004). Timber structure - Test methods - Determination of mechanical properties of wood base panels. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN ISO 7345:2006. (2006). Soojusisolatsioon. Füüsilised suurused ja määratlused. Tallinn: Eesti Standardikeskus.

- G. Williamson, T. P.** (2002). APA Engineered Wood Handbook. New York: McGraw-Hill Companies, Inc. 750 lk.
- Goroško, J.** (2017). Komposiitsete puidust ja betoonist seinaelemendi "Timbet" kandevõime katseline määramine. Eesti Maaülikool. Tartu. 76 lk.
- Guidetti, F.** (28.08.2017). Geoplast Insights. [on-line]
<https://www.geoplastglobal.com/en/insights/energy-consumption-production-of-concrete>
 (20.05.2019)
- Ing. Jitka Berankova, P.** (2008). Protokol o certifikaci vyrobku PCV - 1739/08. Praha: Praha Timber Research and Development Institute.
- Just, E. -J., Õiger, K., Just, A.** (2018). Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 431 lk.
- Jõgeda, T.** (2011). Moodne maja: Savist ja põhust kindlus. Eesti Ekspress, [on-line]
<https://ekspress.delfi.ee/kuum/strong-moodne-maja-strong-savist-ja-pohust-kindlus?id=63317514>
- Kirsipuu, M.** (2006). Piritale kerkib esimene põhust maja. Eesti Päevaleht, [on-line]
<http://epl.delfi.ee/news/melu/piritale-kerkib-esimene-pohust-maja?id=51037990>.
- Kodukuubis. [on-line] <https://kodukuubis.com/> (02.10.2018)
- Komposiitmaterjalid. [on-line]:
<https://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/36779#/section/36779>. (03.04.2019)
- Masso, T., Õiger, K., Rohusaar, J., Mägi, R., Talvik, I., Jaaniso, V., et al.** (2012). Ehituskonstruktori käsiraamat. Autorid ja EHITAME kirjastus. 577 lk.
- Miljan M.-J.** (2007). Kohalike soojusisolatsioonimaterjalide kasutamine piirdekonstruktsioonides. Tartu: Eesti Maaülikool. 63 lk.
- Miljan, J.** (2012). Kohalikud looduslikud ehitusmaterjalid ja nende kasutamine. Tartu: Eesti Maaülikool Metsandus- ja maaehitusinstituut maaehituse osakond. 114 lk.
- Minke, G., Mahlke, F.** (2005). Building with straw. Design and technology of a sustainable architecture. Basel, Berlin, Boston: Birkhäuser - Publisher for Architecture. 143 lk.
- npgallery.nps.gov. [on-line]: <https://npgallery.nps.gov/GetAsset/27674d28-2e91-4159-88fb-e9149964e916/> (14.05.2019)
- Pappel, D.** (2017). Tööstuslikust kanepist soojusisolatsioonimaterjalide omaduste uurimine. Tartu: Eesti Maaülikool. 72 lk.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout C.** 2008. A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings, 40, 394–398
- Pihlapon, P.** (2015). Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ning analüüs. Tartu. 66 lk.
- Riigi Teataja. (2015). Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. Eesti Vabariigi Valitsusemajandus- ja taristuministri määrus nr. 55 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“.

- Saarman, E. V.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Eesti Metsaselts. 560 lk.
- Sartori, I., Hestnes, A.G.** (2006). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: a review article. *Energy and Buildings*, 39, 249–257.
- Steen, A. B., Steen, B., Bainbridge, D., Eisenberg, D.** 1994. *The Straw Bale House*. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vermont, 298 lk.
- Stramitinternational.com. [on-line] <http://stramitinternational.com/history/> (09.03.2019)
- Straw Resource Limited. [on-line] <http://www.strawresource.com/sustainability/> (13.01.2019)
- Sun, R. C.** (2010). *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels: Chemistry, Extractives, Lignins, Hemicelluloses and Cellulose*. Amsterdam: Elsevier Science. 292 lk.
- The Feuillette house. [on-line] <http://cncp-feuillette.fr/maison-feuillette/> (05.05.2019)
- Wanek, C.** (2003). *The New Strawbale Home*. Gibbs Smith, Layton, Utah. 192 lk.
- Wilson, A.** (01.05.1995) *The Next Great Building Material?* [on-line] <https://www.buildinggreen.com/feature/straw-next-great-building-material>. (18.12.2018)
- Visimipex catalogue of fasterner. Seifertova 33, 750 02 Přerov, Czech Republic.
- www.helloasso.com. [on-line] www.helloasso.com/associations/fonds-de-dotation-pour-une-construction-ecologique-et-solidaire/collectes/pour-une-construction-saine-ecologique-reglementee-et-libre-de-droit. (04.05.2019)

SUMMARY

The straw is a rapidly renewable, natural resource, which remains after the grain harvest and thanks to its good mechanical and physical properties, it is gaining popularity as a building material. This master's thesis has focused on the research of the straw panels produced by the Czech company Ekopanely. The purpose was to increase the use of straw panels in construction.

The following tests of this master's thesis, were carried out on test pieces cut out from the straw panels: flexural and compressive strengths, connector screw strength on straw panel and wooden frame. 24 test pieces were prepared for each round of tests. They were cut out from 12 different straw panels, according to standard EVS-EN 789. Since straw fibres layers are orderly placed in the main panels, then according to standards, 12 test pieces had longitudinal straw fibres layers in panel and 12 test pieces - perpendicular.

One of the main goals of the work was to find out how much can the straw panels increase the load capacity of the wooden frames. To perform the tests, test methods were prepared for loading the test pieces and measuring transition. Five straw panels were loaded with vertical pressure. For comparison purpose similar tests were conducted for 3 OSB panels to compare them with wooden wall panels.

In addition to mechanical properties, thermal conductivity was tested on 5 test pieces. Flexural and compression tests were carried out in the wood laboratory in the Institute of Forestry and Rural Engineering of the Estonian University of Life Sciences, with the INSTRON 3369 Universal Electromechanical Test Machine.

Flexibility tests have revealed that flexural strength of the perpendicular straw panel is higher comparing to the longitudinal. As a result of the tests, perpendicular panel has an average flexural strength of 2.19 N / mm² and in the case of longitudinal panel - 1.65 N/mm². Based on the results of the tests, it can be concluded that perpendicular panel is 25% stronger than the longitudinal panel. Tests have also revealed that the quality of the panel coating paper is also very important, as well as, the possible defects. In addition, the test results were compared with the results of a tests conducted by the Prague Timber Research and Development Institute, where was conducted that the flexural strength of

perpendicular panel is 1.46 N/mm² and longitudinal - 1.72 N/mm². Both results are lower than the results of this work, the difference was 13% for the perpendicular panel and 28% for the longitudinal panel.

The results of the compression tests of longitudinal test pieces were quite different. The minimal compressive strength result was 0.51 N / mm² and the maximal was 1.51 N / mm², which makes a difference of 66.3%. The minimal compressive strength result of the perpendicular panel was 0.62 N / mm² and maximal was 1.29 N/mm², which makes the difference between upper and lower values 48% and it is quite big. However, these test results were more consistent, compared with the longitudinal ones. If to compare both perpendicular and longitudinal average compressive strength values, then perpendicular test pieces had the highest values. The average compression strength value of perpendicular panel was 0.86 N / mm² and longitudinal - 0.79 N/mm², which makes a difference of 9%.

Tests on straw and OSB panels, half-timbered panels were conducted in the wood laboratory and in the laboratory of building materials at the Estonian University of Life Sciences, on the test wall with a console. Initially, the load bearing capacity of all the vertical wood panels was measured to find the side that can withstand pressure evenly across the frames. After that, the strength of panel's wooden frame was measured without the panel itself, then the same test was repeated with a panel attached.

The frames were tested on vertical and horizontal pressure until the 8 mm transition was achieved. A total of 5 tests were done. The initial test plan included the use horizontal belts on a wooden frame, however, it did not lead to expected result, because during the straw panel testing vertical bar have crushed, before the maximum transition was reached. Because of this, the test methodology was changed and the horizontal belts were removed. With initial plan 2 tests were done and with changed plan - 3 tests.

As a result of initial test plan, the load capacity of the wooden bars of the first panel has increased in 3.8 times and of the second panel - in 4.9 times. Since the panel itself is long and thin, a bigger transition had a perpendicular panel with a horizontal surface.

Without horizontal belts, second and third panel bars were, before crushing, more flexible than it is allowed, perpendicularly to the vertical surface of the panel. The second panel was more flexible than it is allowed only on the left side and in the same direction as the

horizontal surface. The average results of all 3 panels were either the crush of panel bars or the bend more than it is allowed (8.3 mm) - 141,66 kN. However, the first and the second panels have not reached the transition more than it is allowed (8.3 mm), as at least one bar got broken. The frame without the straw panel have reached the biggest transition allowed - 8.3mm at 34,33 kN. If to compare the results of wooden frame and straw panel tests, the panel have increased the strength in 7 times during the first tests, during the second - in 4 times, and during third - in 2.8 times. In addition to horizontal transitions, vertical transitions were also measured and in this case the straw panel has reduced its transition almost twice.

Three test attempts were done with OSB and vertical panels to obtain a comparison point according to the test plan described above. Generally, either the panel was crushed or the test was finished with 164,12 kN result. As a result, OSB panels have increased the lean capacity of the first panel in 5.3 times, of the second panel in 6.7 times and of the third panel in 6 times.

Regarding the comparison of OSB and straw panels, it can be concluded that OSB panels have increased the lean capacity of bars a bit more than straw panels. During the tests it was revealed that straw panels did not lose their load-bearing capacity as rapidly, as the OSB panels. In the author's opinion, this is a significant advantage over OSB panels.

As part of the master's thesis, the strength of the screw between the straw panel and the wooden frame was measured. This test was carried out with 24 test pieces and half had the fibre layers perpendicularly and half were in the direction of the screw dislocation.

The average result of perpendicular fibre layer transition was 2,23 kN and of the longitudinal - 1,77 kN and, comparing to perpendicular, it is 26% less.

To find out whether the panel density affects the bearing capacity of the screw, two test pieces were compared during 15 mm transition. It was revealed that the strength of panel coating paper is more important than the panel density, because after breaking the paper the screw washer was pushed into straw fibre layers. Panel density played a more important role during perpendicular straw layers tests. According to the test, the panel density and screw load capacity had an average statistical relationship. Based on the data obtained, it can be concluded that after the paper breaks, the screw washer will work as a hook and will hold the straw fibres. The denser the panel is, the more fibre layers will be held by the

washer. This also explains why the load capacity of the perpendicular fibre panel screw was greater than of the longitudinal.

In the final part of the master's thesis the thermal conductivity of the straw panel was measured and compared with the results provided by manufacturer, and with the thermal conductivity of natural materials with similar properties, provided by Estonian University of Life Sciences. Tests were carried out on 5 test pieces that were cut out from 5 different straw panels. The test methodology was obtained from the supervisor and junior scientist Martti-Jaan Miljan. Tests were carried out in the rural construction laboratory with climatic test chamber Feutron 3007-5, additionally, temperature sensors and heat flux plate were used.

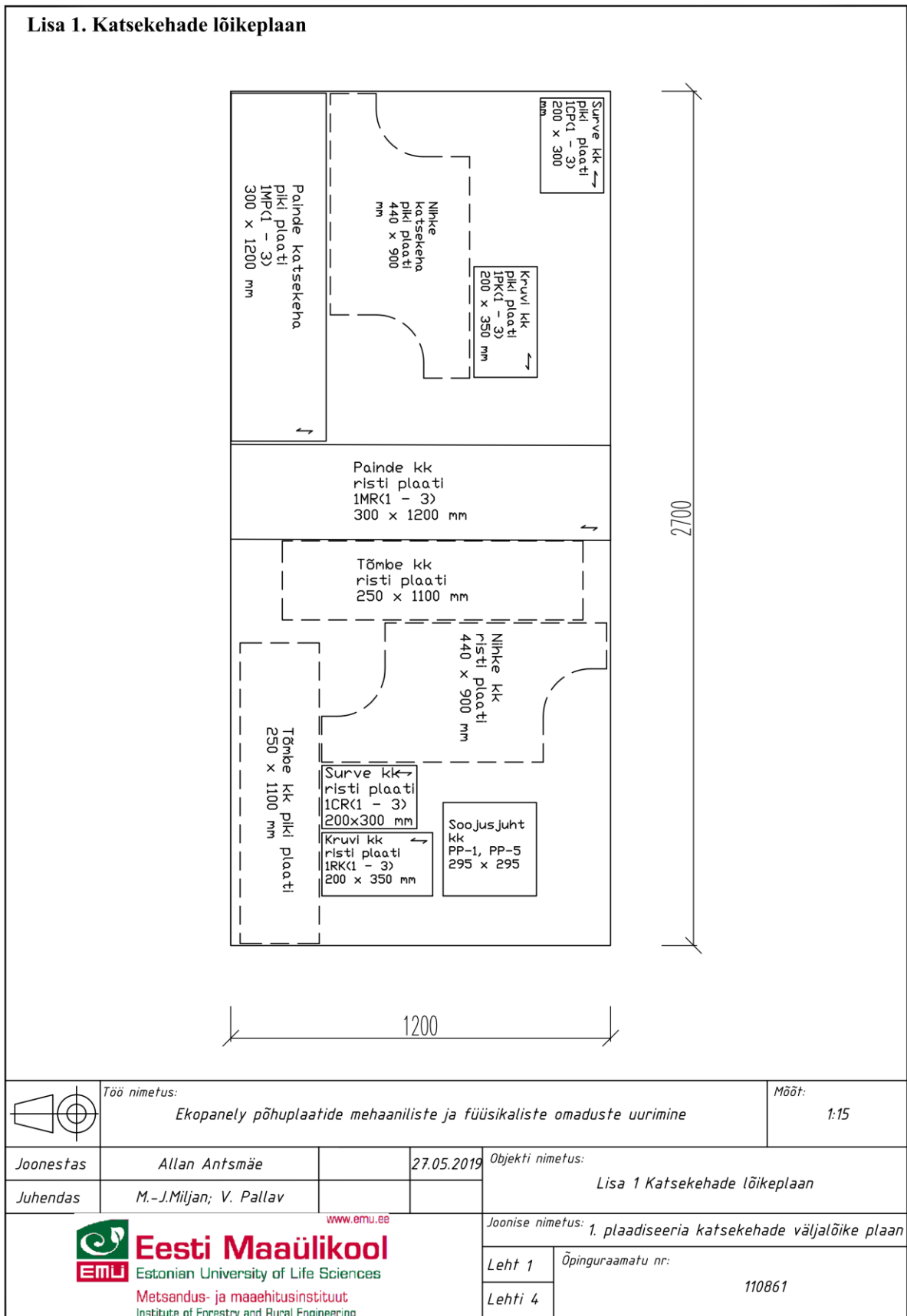
The average result of 5 tests was $0.118 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, which was 19% higher than the factory value ($0.099 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). The large difference in test results could be due to a small number of tests and big difference in the density of the test pieces. In addition, the thermal conductivity of the straw panel was compared with the results of natural materials with similar properties from previously done research works, like blocks of cannabis and lightweight concrete blocks, cannabis and cane insulation boards.

To sum up, the straw panel could be a reinforcing material for wood structures like OSB. The panels also have very good thermal insulation properties with low energy costs, comparing to other similar industrially manufactured building materials.

In the further works, the tension and tensile tests of the straw panels can be done, as well as the direct screw pull out strength and thermal conductivity in different humidity modes can be measured.

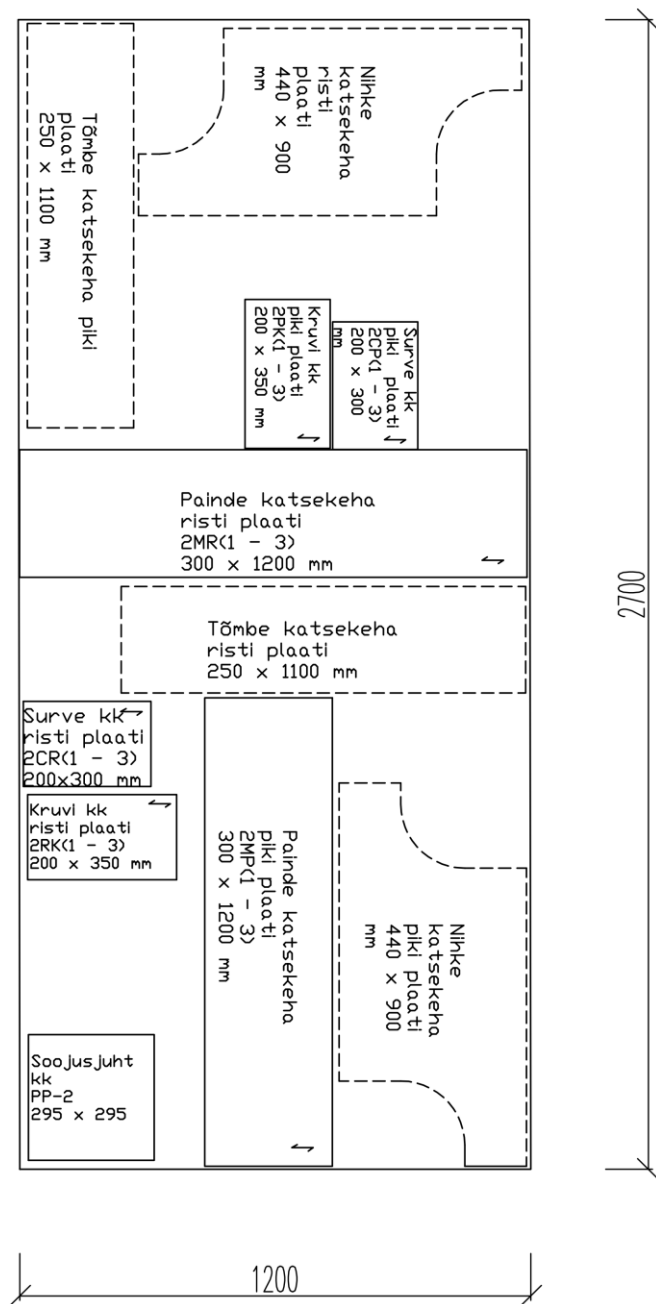
LISAD

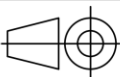
Lisa 1. Katsekehade lõikeplaan



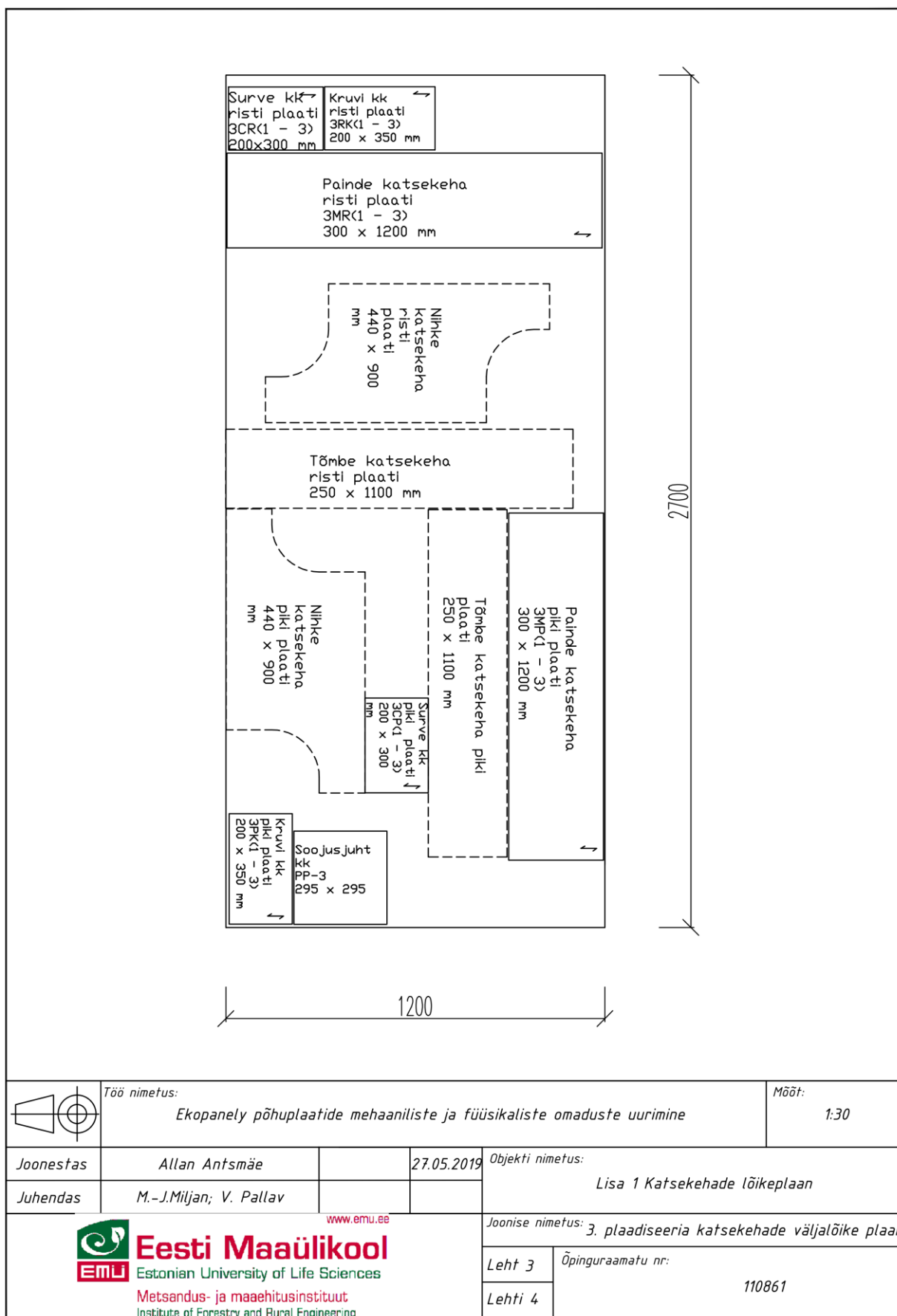
Joonis L1.1. Esimese plaadiseeria katsekehade väljalõike plaan.

Lisa 2. järg



	Töö nimetus: <i>Ekopaneli põhuplaatide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste uurimine</i>			Mõõt: <i>1:15</i>	
Joonestas	Allan Antsmäe		27.05.2019	Objekti nimetus: <i>Lisa 1 Katsekehade lõikeplaan</i>	
Juhendas	M.-J.Miljan; V. Pallav				
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering				Joonise nimetus: <i>2. plaadiseeria katsekehade väljalõike plaan</i>	
				Leht 2	Õpinguraamatu nr: <i>110861</i>
				Lehti 4	

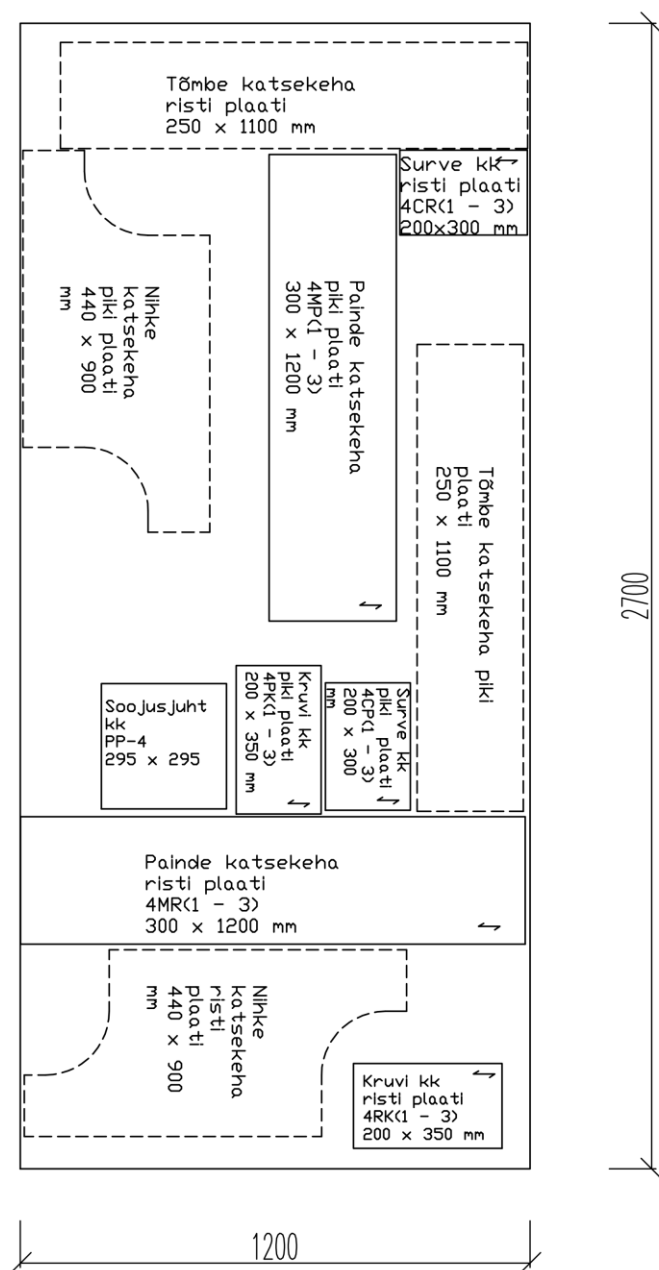
Joonis L1.2. Teise plaadiseeria katsekehade väljalõike plaan.

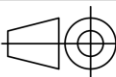



	Töö nimetus: Ekopaneli põhuplaatide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste uurimine	Mõõt: 1:30
Joonestas	Allan Antsmäe	27.05.2019
Juhendas	M.-J.Miljan; V. Pallav	
<div>  Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering </div>		
Joonise nimetus: 3. plaadiseeria katsekehade väljalõike plaan		
Leht 3	Õpinguraamatu nr:	
Lehti 4	110861	

Joonis L1.3. Kolmanda plaadiseeria katsekehade väljalõike plaan.

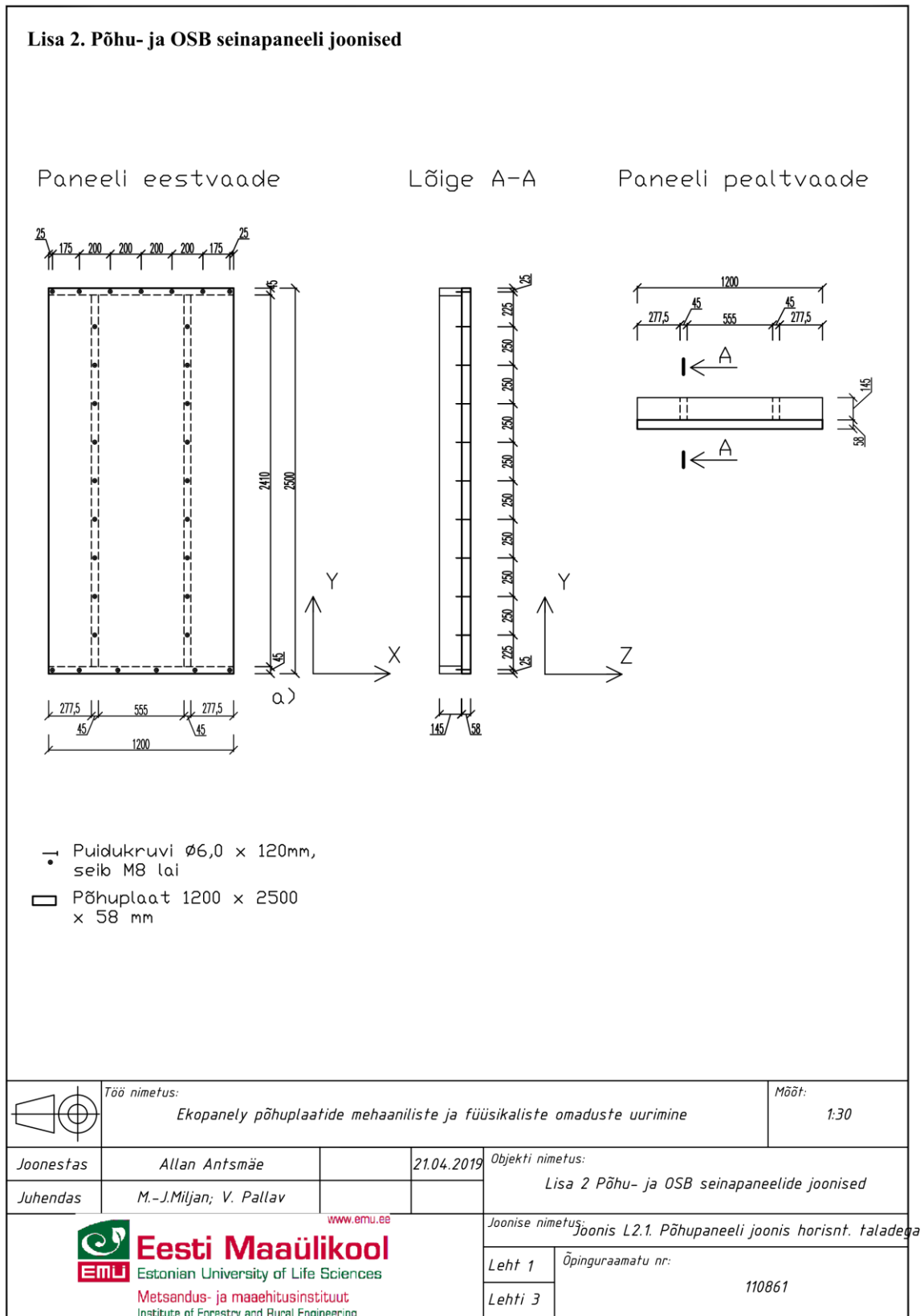
Lisa 2. järg



		Töö nimetus: <i>Ekopanely põhuplaatide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste uurimine</i>		Mõõt: <i>1:30</i>	
Joonestas	<i>Allan Antsmäe</i>		<i>27.05.2019</i>	Objekti nimetus: <i>Lisa 1 Katsekehade lõikeplaan</i>	
Juhendas	<i>M.-J.Miljan; V. Pallav</i>				
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering www.emu.ee				Joonise nimetus: <i>4. plaadiseeria katsekehade väljalõike plaan</i>	
				Leht 4	Õpinguraamatu nr: <i>110861</i>
				Lehti 4	

Joonis L1.4. Neljanda plaadiseeria katsekehade väljalõike plaan.

Lisa 2.Põhu- ja OSB- seinapaneelide joonised

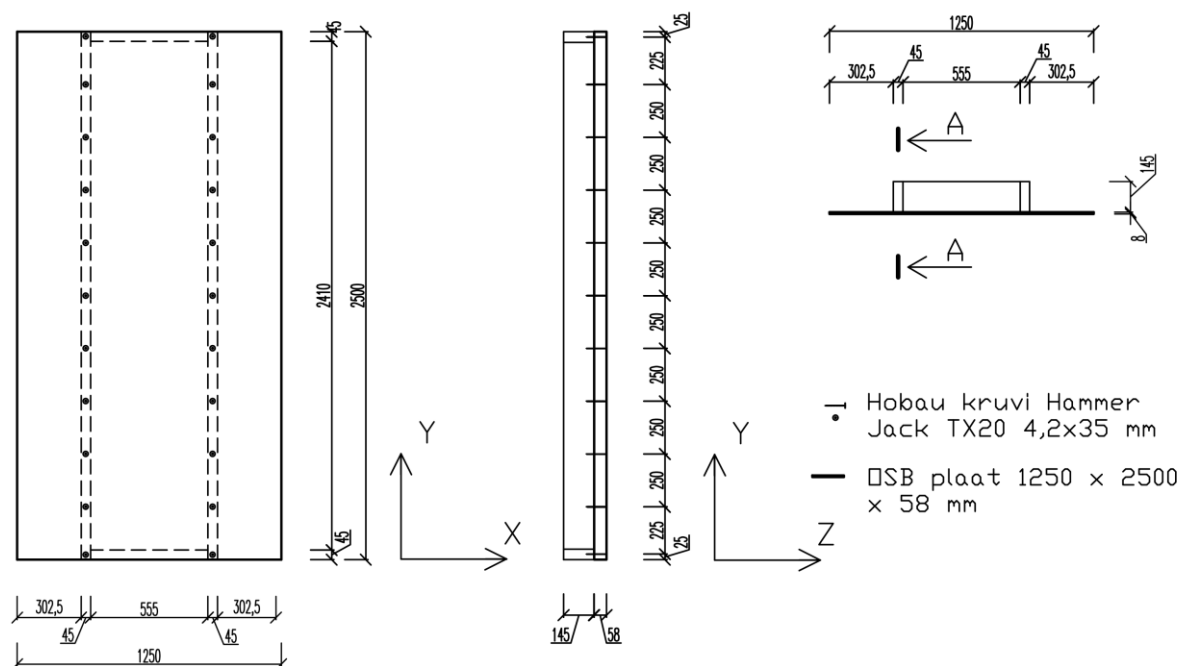


Joonis L2.1. Horisontaalsete- ja vertikaalsete puitprussidega raami ja põhuplaadist paneeli joonis.

Paneeli eestvaade

Lõige A-A

Paneeli pealtvaade



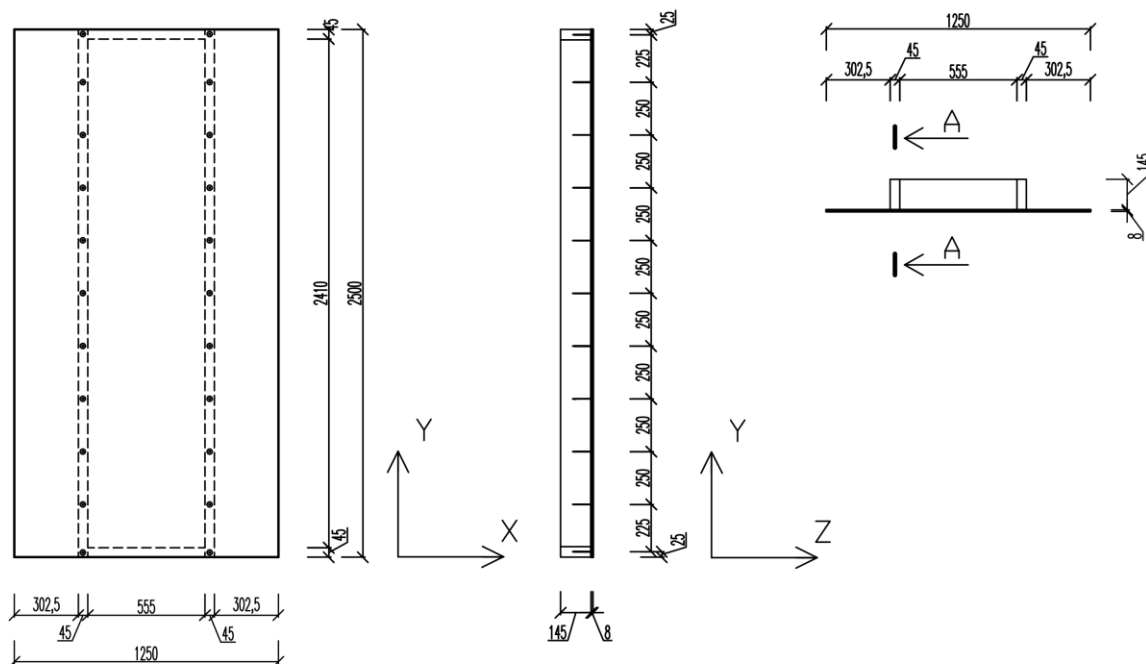
	Töö nimetus: <i>Ekopaneli põhuplaatide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste uurimine</i>			Mõõt: <i>1:30</i>
Joonestas	Allan Antsmäe		21.04.2019	Objekti nimetus: <i>Lisa 2. Põhu- ja OSB seinapaneeli joonised</i>
Juhendas	M.-J.Miljan; V. Pallav			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering				Joonise nimetus: <i>Joonis L2.2. Põhupaneeli joonis</i>
				Leht 2 Õpinguraamatu nr: <i>110861</i>
				Lehti 3

Joonis L2.2. Vertikaalsete puitprussidega ja vaheklotsidega põhupaneeli joonis.

Paneeli eestvaade

Lõige A-A

Paneeli pealtvaade



- Hobau kruvi Hammer Jack TX20 4,2x35 mm
- OSB plaat 1250 x 2500 x 8 mm

	<p>Töö nimetus:</p> <p>Ekopaneli põhuplaatide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste uurimine</p>	<p>Määr:</p> <p>1:30</p>
<p>Joonestaj</p>	<p>Allan Antsmäe</p>	<p>21.04.2019</p>
<p>Juhendas</p>	<p>M.-J.Miljan; V. Pallav</p>	<p>Objekti nimetus:</p> <p>Lisa 2 Põhu- ja OSB seinapaneeli joonised</p>
<p> Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering</p>		<p>Joonise nimetus:</p> <p>Joonis L2.3. OSB paneeli joonis</p> <p>Leht 3 Õpinguraamatu nr:</p> <p>Lehti 3 110861</p>

Joonis L2.3. Vertikaalsete puitprussidega ja vaheklotsidega OSB paneeli joonis.

Lisa 3. Painde katsekehade mõõdud, katsetulemuste andmed ja katsekehade purunemise pildid

Tabel L3.1. Paindekatsekehade mõõdud, kaalud ja tihedus

Katsekeha nr	Pikkus [mm]	Laius [mm]	Paksus [mm]	Kaal [g]	Tihedus ρ [kg/m ³]
1MP1	1200	298,53	59,12	9226,00	435,62
1MP2	1200	303,38	58,87	8428,00	393,24
1MP3	1200	301,6	59,53	7918,00	367,51
2MP1	1200	300,4	59,9	8252,00	382,17
2MP2	1200	302,32	59,43	7220,00	334,88
2MP3	1200	300,96	60,01	8121,00	374,71
3MP1	1200	301,84	59,38	7970,00	370,56
3MP2	1200	303,33	59,26	7286,00	337,78
3MP3	1200	302,15	59,84	8862,00	408,45
4MP1	1200	305,65	59,08	8916,00	411,46
4MP2	1200	302,85	59,39	7516,00	348,23
4MP3	1200	302,23	59,73	7148,00	329,97
1MR1	1200	302,08	61,76	8246,00	368,33
1MR2	1200	303,01	60,08	8062,00	369,04
1MR3	1200	300,57	59,7	8282,00	384,62
2MR1	1200	301,03	60,75	8416,00	383,50
2MR2	1200	301,92	60,07	8288,00	380,82
2MR3	1200	300,64	60,37	8080,00	370,99
3MR1	1200	300,87	60,86	8376,00	381,19
3MR2	1200	301,46	59,87	7550,00	348,60
3MR3	1200	300,94	60,68	8004,00	365,26
4MR1	1200	300,47	59,86	8446,00	391,32
4MR2	1200	300,75	60,35	7730,00	354,91
4MR3	1200	298,63	60,58	7732,00	356,16

Tabel L3.2 Pikiplaati lõigatud katsekehade paindemoment, läbipained, paindetugevused ja elastsusmoodulid

Katsekeha nr	Maksimaalne surve [kN]	Maksimaalne läbipaine [mm]	Maksimaalne paindetugevus f_m [N/mm ²]	Elastsusmoodul E [N/mm ³]
1MP1	1,14	43,93	1,64	331,96
1MP2	1,38	54,69	1,88	307,23
1MP3	1,33	85,94	1,87	263,52
2MP1	0,83	32,82	1,16	314,31
2MP2	0,59	32,06	0,83	111,48
2MP3	1,25	98,96	1,64	233,21
3MP1	1,17	75,41	1,65	286,58
3MP2	1,18	116,09	1,66	219,19
3MP3	1,57	65,38	2,18	315,48
4MP1	1,25	60,10	1,76	284,29
4MP2	1,27	109,41	1,79	215,03
4MP3	1,21	96,64	1,69	231,61
Keskmine tulemus	1,18	72,62	1,65	259,49

Tabel L3.3 Ristiplaati lõigatud katsekehade paindemoment, läbipained, paindetugevused ja elastsusmoodulid

Katsekeha nr	Maksimaalne surve [kN]	Maksimaalne läbipaine [mm]	Maksimaalne paindetugevus f_m [N/mm ²]	Elastsusmoodul E [N/mm ³]
1MR1	1,69	35,31	2,20	376,31
1MR2	1,35	34,14	1,85	369,09
1MR3	2,02	28,90	2,83	591,39
2MR1	1,56	25,83	2,11	397,52
2MR2	1,36	35,50	1,88	269,85
2MR3	1,72	63,95	2,36	428,23
3MR1	1,72	45,17	2,32	395,06
3MR2	1,58	39,15	2,19	386,63
3MR3	1,62	20,64	2,20	503,68
4MR1	1,48	28,32	2,06	387,52
4MR2	1,52	25,78	2,08	407,45
4MR3	1,66	25,54	2,27	442,93
Keskmine tulemus	1,61	34,02	2,20	412,97



Joonis L3.1. Piki plaati katsekeha 1MP1.



Joonis L3.2. Piki plaati katsekeha 1MP2.



Joonis L3.3. Piki plaati katsekeha 1MP3.



Joonis L3.4. Piki plaati katsekeha 2MP1.



Joonis L3.5. Piki plaati katsekeha 2MP2.



Joonis L3.6. Piki plaati katsekeha 2MP3.



Joonis L3.7. Piki plaati katsekeha 3MP1.



Joonis L3.8. Piki plaati katsekeha 3MP2.



Joonis L3.9. Piki plaati katsekeha 3MP3.



Joonis L3.10. Piki plaati katsekeha 4MP1.



Joonis L3.11. Piki plaati katsekeha 4MP2.



Joonis L3.12. Piki plaati katsekeha 4MP3.



Joonis L3.13. Ristiplaati katsekeha 1MR1.



Joonis L3.14. Ristiplaati katsekeha 1MR2.



Joonis L3.15. Ristiplaati katsekeha 1MR3.



Joonis L3.16. Ristiplaati katsekeha 2MR1.



Joonis L3.17. Ristiplaati katsekeha 2MR2.



Joonis L3.18. Ristiplaati katsekeha 2MR3.



Joonis L3.19. Ristiplaati katsekeha 3MR1.



Joonis L3.20. Ristiplaati katsekeha 3MR2.



Joonis L3.21. Ristiplaati katsekeha 3MR3.



Joonis L3.22. Ristiplaati katsekeha 4MR1.



Joonis L3.23. Ristiplaati katsekeha 4MR2.



Joonis L3.24. Ristiplaati katsekeha 4MR3.

Lisa 4. Surve katsekehade mõõdud, katsetulemuste andmed ja katsekehade purunemise pildid

Tabel L4.1. Surve katsekehade mõõdud, kaalud, tihedus ja niiskussisaldus

Katsekeha nr	Pikkus [mm]	Laius [mm]	Paksus [mm]	Kaal [g]	Tihedus ρ [kg/m ³]	Niiskuse-sisaldus [%]
1CP1	300,00	201,88	59,91	1373,06	378,42	12,68
1CP2	300,00	201,29	59,41	1281,32	357,15	13,60
1CP3	300,00	202,30	59,90	1449,51	398,73	13,68
2CP1	300,00	200,26	60,02	1367,98	379,37	13,28
2CP2	300,00	201,23	59,31	1392,43	388,89	14,58
2CP3	300,00	201,73	59,80	1324,13	365,88	13,65
3CP1	300,00	200,20	59,17	1590,18	447,48	13,75
3CP2	300,00	200,84	60,41	1298,65	356,79	14,59
3CP3	300,00	202,31	60,41	1438,20	392,26	13,53
4CP1	300,00	201,84	58,91	1479,07	414,65	13,69
4CP2	300,00	202,25	59,71	1518,83	419,23	13,90
4CP3	300,00	201,27	60,24	1470,92	404,43	13,55
				Keskmine	391,94	13,71
1CR1	300,00	201,17	59,97	1352,68	373,75	13,22
1CR2	300,00	199,62	61,38	1357,2	369,23	13,50
1CR3	300,00	201,48	59,47	1302,73	362,41	5,10
2CR1	300,00	201,51	60,48	1501,5	410,67	12,91
2CR2	300,00	208,11	59,40	1221,18	329,29	14,19
2CR3	300,00	200,80	60,10	1304,76	360,39	13,90
3CR1	300,00	201,37	59,47	1302,73	362,61	13,57
3CR2	300,00	201,72	59,86	1200,79	331,48	13,37
3CR3	300,00	202,15	60,08	1505,58	413,22	14,03
4CR1	300,00	201,34	59,66	1284,38	356,42	14,72
4CR2	300,00	200,74	59,83	1123,32	311,77	13,55
4CR3	300,00	200,68	61,41	1359,81	367,80	13,90
				Keskmine	362,42	13,00

Tabel L4.2. Pikiplaati lõigatud katsekehade survetugevus, elastsusmoodul ja tihedus

Katsekeha nr	Maksimaalne surve [kN]	Maksimaalne survetugevus f_c [N/mm ²]	Elastsusmoodul E [N/mm ³]	Tihedus ρ [kg/m ³]
1CP1	8,73	0,72	137,00	37,84
1CP2	6,60	0,55	45,96	35,72
1CP3	10,29	0,85	115,80	39,87
2CP1	6,24	0,52	523,66	37,94
2CP2	9,87	0,83	548,86	38,89
2CP3	7,91	0,66	81,90	36,59
3CP1	17,85	1,51	17,21	44,75
3CP2	7,90	0,65	234,11	35,68
3CP3	6,20	0,51	89,89	39,23
4CP1	12,69	1,07	90,57	41,47
4CP2	10,70	0,89	2016,16	41,92
4CP3	-	-	-	40,44
Keskmine tulemus	9,54	0,79	354,65	39,19

Tabel L4.3. Ristiplaati lõigatud katsekehade survetugevus, elastsusmoodul ja tihedus

Katsekeha nr	Maksimaalne surve [kN]	Maksimaalne survetugevus f_c [N/mm ²]	Elastsusmoodul E [N/mm ³]	Tihedus ρ [kg/m ³]
1CR1	7,53	0,62	193,58	37,37
1CR2	7,63	0,62	558,42	36,92
1CR3	15,42	1,29	196,89	36,24
2CR1	13,91	1,14	172,96	41,07
2CR2	8,11	0,66	232,05	32,93
2CR3	10,64	0,88	489,81	36,04
3CR1	7,55	0,63	163,69	36,26
3CR2	7,88	0,65	136,65	33,15
3CR3	14,89	1,23	427,22	41,32
4CR1	10,66	0,89	-	35,64
4CR2	10,65	0,89	165,04	31,18
4CR3	10,79	0,88	139,24	36,78
Keskmine tulemus	10,47	0,86	261,41	36,24



Joonis L4.1. Piki plaati katsekeha 1CP1.



Joonis L4.2. Piki plaati katsekeha 1CP2.



Joonis L4.3. Piki plaati katsekeha 1CP3.



Joonis L4.4. Piki plaati katsekeha 2CP1.



Joonis L4.5. Piki plaati katsekeha 2CP2.



Joonis L4.6. Piki plaati katsekeha 2CP3.



Joonis L4.7. Piki plaati katsekeha 3CP1.



Joonis L4.8. Piki plaati katsekeha 3CP2.



Joonis L4.9. Piki plaati katsekeha 3CP3.



Joonis L4.10. Piki plaati katsekeha 4CP1.



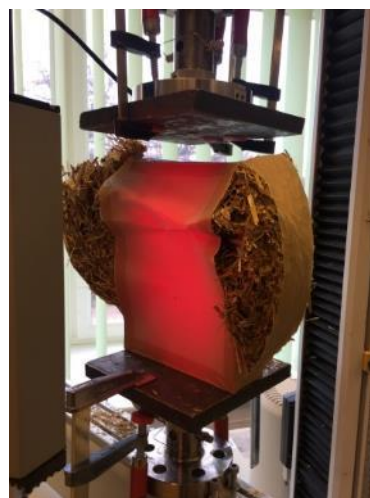
Joonis L4.11. Piki plaati katsekeha 4CP2.



Joonis L4.12. Piki plaati katsekeha 4CP3.



Joonis L4.13. Ristiplaati katsekeha 1CR1.



Joonis L4.14. Ristiplaati katsekeha 1CR2.



Joonis L4.15. Ristiplaati katsekeha 1CR3.



Joonis L4.16. Ristiplaati katsekeha 2CR1.



Joonis L4.17. Ristiplaati katsekeha 2CR2.



Joonis L4.18. Ristiplaati katsekeha 2CR3.



Joonis L4.19. Ristiplaati katsekeha 3CR1.



Joonis L4.20. Ristiplaati katsekeha 3CR2.



Joonis L4.21. Ristiplaati katsekeha 3CR3.



Joonis L4.22. Ristiplaati katsekeha 4CR1.



Joonis L4.23. Ristiplaati katsekeha 4CR2.



Joonis L4.24. Ristiplaati katsekeha 4CR3.

Lisa 5. Puitpostide koormused lubatud maksimaalsete nõtkete juures, ristlõike mõõdud ja niiskussisaldused

Tabel L5.1. Puitpostide 45 x 145 mm vertikaalsed koormused lubatud maksimaalsete nõtkete juures

Puitposti nr	Nõtke suurus, [mm]	Koormus, [kN]
Post nr 1	8,00	51,71
Post nr 2	8,39	20,40
Post nr 3	8,13	15,28
Post nr 4	8,32	10,90
Post nr 5	8,39	11,75
Post nr 6	8,04	13,89
Post nr 7	8,03	16,77
Post nr 1.1	8,09	15,81
Post nr 1.2	8,09	69,98
Post nr 2.1	8,08	42,00
Post nr 2.2	8,15	20,09
Post nr 3.1	8,52	48,29
Post nr 4.1	8,23	51,60
Post nr 4.2	8,15	17,20
Post nr 5.1	8,04	16,45
Post nr 5.2	8,30	15,81
Post nr 6.1	8,07	13,78
Post nr 6.2	8,01	13,25

Tabel L5.3 Paneelikatsetel kasutatud põhuplaatide niiskussisaldused ja tihedus

Katsekeha nr	Niiskuse-sisaldus [%]	Tihedus ρ [kg/m³]
Põhuplaad 1	40,33	381,58
Põhuplaad 2	10,34	371,63
Põhuplaad A	66,86	450,92
Põhuplaad B	9,27	459,29

Tabel L5.3 Puitpostide ristlõike mõõdud ja niiskussisaldused

Posti nr	2	3	6	7	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2
45 x 145 mm ristlõike laius, [mm]	143,73	144,63	144,72	144,07	144,53	144,10	143,62	143,11	143,93	143,61	144,84	144,32	144,60	144,52	144,32	144,52
	144,28	144,27	144,83	144,17	144,49	144,32	144,23	143,14	144,17	144,22	144,60	144,86	144,37	144,43	144,76	144,71
	143,98	143,46	144,19	144,31	144,54	144,63	144,02	142,80	143,93	143,70	144,78	144,79	143,83	144,09	144,57	144,01
Keskmine	144,00	144,12	144,58	144,18	144,52	144,35	143,96	143,02	144,01	143,84	144,74	144,66	144,27	144,35	144,55	144,41
Standardhälve	0,28	0,60	0,34	0,12	0,03	0,27	0,31	0,19	0,14	0,33	0,12	0,29	0,40	0,23	0,22	0,36
45 x 145 mm ristlõike kõrgus, [mm]	43,96	44,23	44,16	43,79	44,09	44,02	43,70	44,00	44,10	43,98	44,25	44,08	44,13	44,10	44,15	43,86
	44,14	44,33	44,18	43,93	44,18	44,05	43,83	43,98	44,35	44,10	44,22	44,18	44,32	44,08	44,04	43,96
	44,18	44,18	44,29	44,12	43,89	44,23	44,02	43,69	43,91	44,28	44,20	44,24	44,11	44,25	43,98	43,83
Keskmine	44,09	44,25	44,21	43,95	44,05	44,10	43,85	43,89	44,12	44,12	44,22	44,17	44,19	44,14	44,06	43,88
Standardhälve	0,12	0,08	0,07	0,17	0,15	0,11	0,16	0,17	0,22	0,15	0,03	0,08	0,12	0,09	0,09	0,07
Niiskussisaldus, [%]	17,70	18,00	17,70	16,90	15,50	18,70	18,00	17,80	17,00	17,00	17,60	16,20	18,30	17,90	19,10	18,20
	17,30	18,20	17,20	17,30	19,60	19,40	19,30	20,10	17,70	18,60	18,30	18,10	19,60	20,00	19,00	19,30
	17,50	17,90	17,50	17,10	18,50	17,80	17,90	18,80	17,40	17,60	16,00	17,10	18,00	17,60	18,20	18,60
Keskmine	17,50	18,03	17,47	17,10	17,87	18,63	18,40	18,90	17,37	17,73	17,30	17,13	18,63	18,50	18,77	18,70
Standardhälve	0,20	0,15	0,25	0,20	2,12	0,80	0,78	1,15	0,35	0,81	1,18	0,95	0,85	1,31	0,49	0,56

Lisa 6. Raami nõttekatsetel rakendatud vertikaalsed koormused

Katsekeha nr	Koormus raamile, [kN]	Nõtte vasakpoolses puitpostis, [mm]	Nõtte parempoolses puitpostis, [mm]
Põhu raam A (postid – vasakul nr 7 ja paremal nr 2)	81,41	8,00	4,69
	110,15	15,53	5,70
Põhu raam B (postid – vasakul nr 3 ja paremal nr 6)	81,41	8,00	4,69
	110,15	15,53	5,70
OSB raam 1 (postid - vasakul nr 1.2 ja paremal nr 4.1)	67,09	8,03	2,94
	117,20	28,21	8,04
OSB raam 2 (postid – vasakul nr 5.1 ja paremal nr 4.2)	52,80	8,13	3,80
	91,70	16,69	8,06
OSB raam 3 (postid – vasakul nr 6.1 ja paremal nr 6.2)	50,64	8,06	4,60
	83,44	16,28	8,06
Põhu raam 1 (postid – vasakul nr 5.2 ja paremal nr 3.2)	48,00	8,05	7,75
	49,50	8,26	8,05
Põhu raam 2 (postid – vasakul nr 1.1 paremal nr 2.2)	72,44	8,11	7,87
	74,25	8,32	8,00
Põhu raam 3 (postid – vasakaul nr 2.1 ja paremal nr 3.1)	103,00	3,77	8,38
	109,94	5,83	41,98

Lisa 7. Põhuplaatidega seinapaneelide katse tulemused

Katsekeha	Maksimaalne koormus, [kN]	Märkused
Põhupaneel 1	288,35	Toimus parempoolse posti (3.2) purunemine, posti alaostast $\frac{1}{4}$ kõrguselt. Post purunes oksakohalt. Toimus paneeli nõtkes z-telje suunas, karkassi postide suunas.
Põhupaneel 2	298,72	Toimus mõlema posti purunemine. Vasakpoolne post (post 1.1) murdis keskkohast puidukiudude kokkusurumise tagajärjel, sammuti oli murdumise jälg posti alaostas puidukiudude kokkusurumise tõttu. Parempoolne post (post 2.2) murdis posti alaostast $\frac{1}{4}$ kõrguselt puidukiudude kokkusurumise tagajärjel. Paneel nõtkus z-telje suunas välja põhuplaadi suunas, vasakpoolse posti kohapealt.
Põhupaneel 3	276,07	Toimus mõlema posti purunemine. Parempoolse posti (post 3.1) murdumine toimus posti keskkohast puidukiudude kokkusurumise tagajärjel oksakohast. Vasakpoolne post murdis puidukiudude kokkusurumise tõttu. Toimus paneeli väljanõtkumine z-telje suunas, põhuplaadi poole.

Lisa 8. OSB plaatidega seinapaneelide katsete tulemused

Katsekeha	Maksimaalne koormus, [kN]	Märkused
OSB paneel 1	361,54	Toimus vasakpoolse posti (post 1.2) purunemine, posti murdus natuke ülevalt poolt keskkoha. Pruss lõhestati osaliselt. Osad kinnituskruvid tulid välja puitprussist ja osad kruvid tõmmati läbi OSB plaadi. Vahetult enne purunemist olid nõtked puitprussides x-telje suunas kui ka terve paneeli nõtkumine z-telje suunas, karkassi postide poole.
OSB paneel 2	328,21	Katse lõpetati vahetult enne paneeli purunemist. Nõtked toimusid mõlemas paneeli postis. Vasakpoolne post (post 5.1) nõtkus x-telje suunas keskosast välja kuni 6,52 mm ja z-telje suunas 2,28 mm. z-teljeline liikumine oli OSB plaadi poole. Parempoolne post (post 4.2) nõtkus posti $\frac{3}{4}$ peal välja 4,78 mm, z-telje suunaline nõtke praktiliselt puudus. See oli 0,88 mm posti suunas. OSB plaadi kinnituskruvid ei tulnud prussist välja ega ei tõmmatud läbi OSB plaadi.
OSB paneel 3	311,43	Toimus vasakpoolne post purunemine puidukiudude kokkusurumise tõttu väikesest oksakohast. Paneelil puudus praktiliselt z-telje suunaline nõtkumine. Mõlemas postis jäi see alla 1 mm. x-telje suunaline nõtkumine toimus enne purunemist mõlema posti keskel ja alumise kolmandiku peal. Vasakpoolses postis oli suurim nõtkumine posti keskel 10,93 mm ja parempoolses postis posti alaosas $\frac{3}{4}$ peal 3,12 mm.

Lisa 9. Põhu- ja OSB paneelide katsetuste pildid



Joonis L9.1. Põhupaneeli A ülemise vasaku posti otsa muljumise jälg horisontaalsesse prussi.

Joonis L9.2. Põhupaneeli A ülemise parema posti otsa muljumise jälg horisontaalsesse prussi.



Joonis L9.3. Põhupaneeli A alumise vasaku posti otsa muljumine horisontaalsesse prussi.



Joonis L9.4. Põhupaneeli A alumise parema posti otsa muljumine horisontaalsesse prussi.



Joonis L9.5. Põhupaneeli A alumise horisontaalse prussi pragunemine survekatset.



Joonis L9.6. Põhupaneeli B peale katse lõppu.



Joonis L9.7. Põhupaneeli B ülemise vasaku posti otsa muljumine horisontaalsesse prussi.



Joonis L9.8. Põhupaneeli B ülemise parema posti otsa muljumine horisontaalsesse prussi.



Joonis L9.9. Põhupaneeli B alumise vasaku posti otsa muljumine horisontaalsesse prussi.



Joonis L9.10 Põhupaneeli B alumise parema posti otsa muljumine horisontaalsesse prussi.



Joonis L9.11. Põhupaneeli 1 parema posti purunemine.



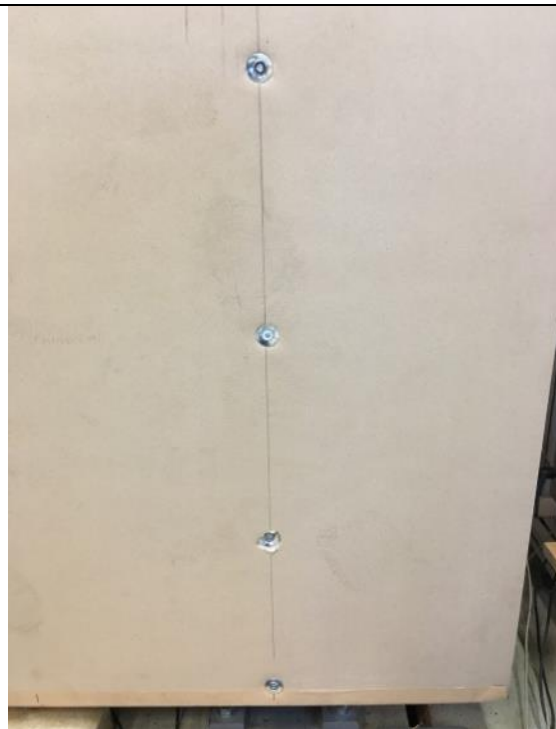
Joonis L9.12 Põhupaneeli 1 parema posti purunemine.



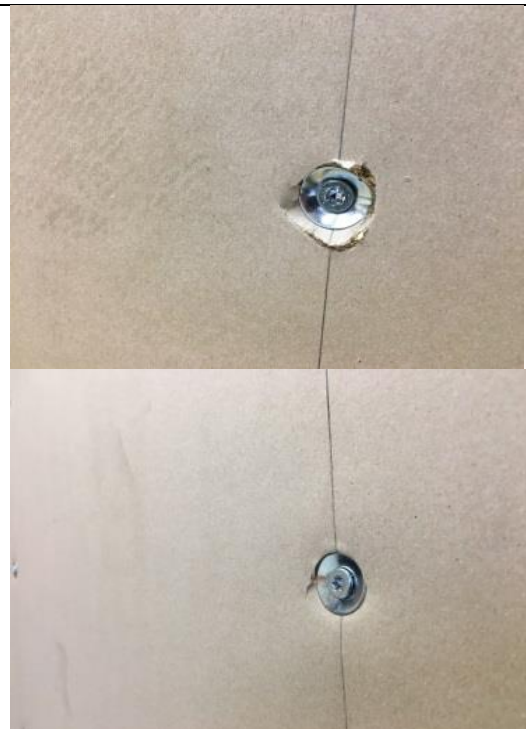
Joonis L9.13. Põhupaneeli 1 parema posti purunemine.



Joonis L9.14. Põhupaneeli 1 purunenud raam.



Joonis L9.15. Põhupaneeli 1 parema posti kruvide muljumine põhuplaadis.



Joonis L9.16. Põhupaneeli 1 parema posti kruvide muljumine põhuplaadis.



Joonis L9.17. Põhupaneel 2 välisküljelt peale katse lõppu.



Joonis L9.18. Põhupaneeli 2 mõlemad postid on purunenud, vasak keskkohast ja parem alt $\frac{1}{4}$ kõrguselt.



Joonis L9.19. Põhupaneeli 2 vasaku posti murdumise posti keskkohast külgvaates.



Joonis L9.20. Põhupaneeli 2 vasaku posti murdumine pealtvaates.



Joonis L9.21. Põhupaneeli 2 parema posti murdumise jälg külgvaates.



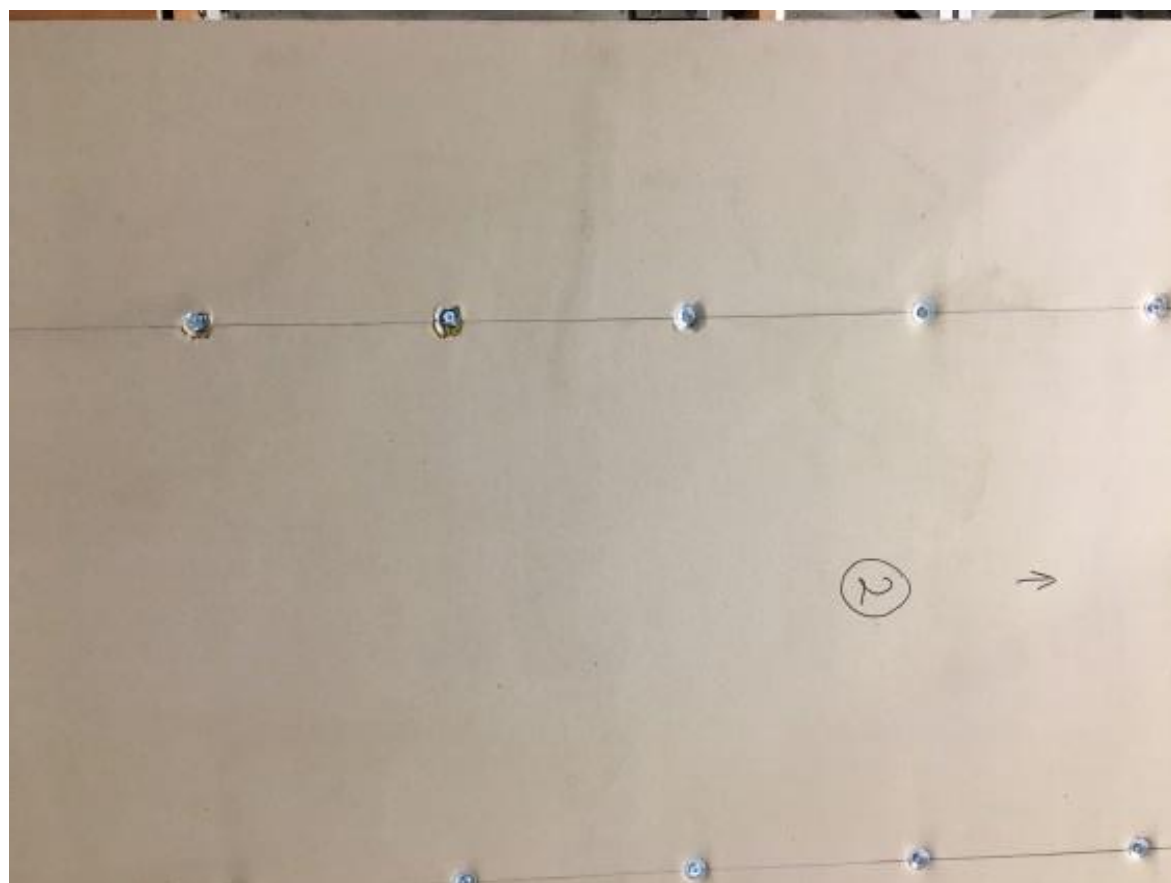
Joonis L9.22. Põhupaneeli 2 parema posti murdumise jälg pealtvaates.



Joonis L9.23. Põhupaneeli 2 parema posti murdumise jälg külgsaates.



Joonis L9.24. Põhupaneeli 2 parema posti murdumine pealtvaates.



Joonis L9.25. Põhupaneeli 2 vasaku posti kinnituskruvide muljumine plaadi pinna sisse.



Joonis L9.26. Põhupaneeli 3 parempoolse posti purunemine posti keskkohast.



Joonis L9.27. Põhupaneeli 3 parempoolse posti purunemine keskkohast oksa juurest.



Joonis L9.28. Põhupaneeli 3 postide kinnituskruvid peale katse lõppu.



Joonis L9.29. Põhupaneeli 3 parempoolse posti kinnituskruvide muljumine plaadi välispinna sisse.



Joonis L9.30. Põhupaneeli 3 parempoolse posti kaks kõige rohkem plaadi pinna sisse muljunud kinnituskruvi.



Joonis L9.31. Vasakpoolse posti murdekoht posti keskosas.



Joonis L9.32. OSB paneel 1 vahetult peale katse lõppu.



Joonis L9.33. OSB paneeli 1 purunenud vasakpoolne post.



Joonis L9.34. OSB paneeli 1 purunenud vasakpoolne post.



Joonis L9.35. OSB paneeli 1 purunenud vasakpoolne post.



Joonis L9.36. OSB paneeli 1 purunenud vasakpoolne post.



Joonis L9.37. OSB paneeli 1 purunenud vasakpoolne post.



Joonis L9.38. OSB paneeli 1 purunenud vasakpoolne post.



Joonis L9.39. OSB paneeli 1 parempoolse posti nihke tagajärjel toimunud kruvide liikumine.



Joonis L9.40. OSB paneeli 1 parempoolse posti siirde tagajärjel toimunud kruvide liikumine.



Joonis L9.41. OSB paneeli 1 vasakpoolse posti purunemise tagajärjel toimunud kruvide liikumine.



Joonis L9.42. OSB paneel 2 peale katse lõppu.



Joonis L9.43. OSB paneel 2 paneeli posti ja plaadi nihkumine paneeli alumises otsas.



Joonis L9.44. OSB paneel 2 kinnituskruvide muljumine.



Joonis L9.45. OSB paneel 2 kruvi muljumine plaati.



Joonis L9.46. OSB paneel 2 kruvi muljumine plaati.



Joonis L9.47. OSB paneel 3 vasaku posti purunemine.



Joonis L9.48. OSB paneel 3 vasaku posti purunemine.



Joonis L9.49. OSB paneel 3 vasaku posti purunemine.



Joonis L9.50. OSB paneel 3 parem poolse posti kinnituskruvide tekitatud pragu.



Joonis L9.51. OSB paneel 3 kruvipeade läbitõmbamine OSB plaadist.



Joonis L9.52. OSB paneel 3 kruvipeade läbitõmbamine OSB plaadist.

Lisa 10. Kruvi kinnituse katsekehade mõõdud, katsetulemuste andmed ja katsekehade purunemise pildid

Tabel L10.1. Kruvi kinnituse põhuplaadist lõigatud katsekehade mõõdud, kaal ja tihedus

Katsekeha nr	Pikkus [mm]	Laius [mm]	Paksus [mm]	Kaal [g]	Tihedus ρ [kg/m ³]
1PK1	350,00	200,18	60,59	1468,30	345,89
1PK2	349,00	199,93	59,04	1618,50	392,88
1PK3	350,00	203,25	59,70	1612,20	379,62
2PK1	351,00	202,55	60,48	1488,05	346,08
2PK2	350,00	200,55	59,90	1529,60	363,81
2PK3	351,00	203,27	59,71	1566,60	367,73
3PK1	351,00	199,90	59,31	1673,70	402,20
3PK2	352,00	201,20	59,80	1517,55	358,32
3PK3	350,00	200,36	59,55	1579,05	378,13
4PK1	350,00	200,71	59,74	1512,00	360,29
4PK2	350,00	202,01	60,40	1516,90	355,21
4PK3	351,00	199,95	59,45	1585,00	379,89
			Keskmine	1555,62	369,17
1RK1	352,00	200,90	59,80	1658,30	392,15
1RK2	350,00	202,04	59,82	1674,55	395,86
1RK3	350,00	202,22	59,65	1665,30	394,45
2RK1	351,00	200,82	59,60	1640,30	390,45
2RK2	350,00	201,85	59,77	1673,05	396,21
2RK3	351,00	201,57	60,08	1849,05	435,00
3RK1	350,00	200,08	59,26	1506,30	362,99
3RK2	349,00	203,14	59,46	1618,70	383,99
3RK3	350,00	201,60	59,64	1703,05	404,71
4RK1	349,00	201,08	59,52	1616,90	387,11
4RK2	351,00	202,28	59,85	1500,45	353,10
4RK3	351,00	202,30	59,48	1828,20	432,86
			Keskmine	1661,18	394,07

Tabel L10.2. Kruvi kinnituse puitklotside katsekehade mõõdud, kaal ja tihedus

Katsekeha nr	Pikkus [mm]	Laius [mm]	Paksus [mm]	Kaal [g]	Tihedus ρ [kg/m ³]
1PK1-K	398,00	142,07	43,25	1115,25	456,04
1PK2-K	397,00	142,44	43,71	1098,15	444,28
1PK3-K	398,00	142,62	43,31	1228,45	499,70
2PK1-K	399,00	143,08	43,70	1120,50	449,14
2PK2-K	397,00	142,43	42,87	1158,40	477,87
2PK3-K	398,00	142,65	43,78	1109,50	446,37
3PK1-K	396,00	143,10	43,75	1129,25	455,49
3PK2-K	398,00	142,43	43,60	1110,55	449,33
3PK3-K	398,00	142,40	43,68	1086,60	438,93
4PK1-K	398,00	142,39	43,62	1155,00	467,23
4PK2-K	397,00	142,67	42,99	1212,80	498,08
4PK3-K	397,00	142,89	43,63	1585,00	640,40
			Keskmine	1175,79	476,90
1RK1-K	399,00	142,89	44,09	1109,25	441,28
1RK2-K	397,00	143,19	43,82	1112,65	446,67
1RK3-K	399,00	143,24	43,89	1109,35	442,25
2RK1-K	398,00	143,03	43,81	1124,00	450,70
2RK2-K	399,00	143,38	43,36	1116,75	450,20
2RK3-K	398,00	143,18	43,45	1141,50	461,02
3RK1-K	398,00	143,43	43,28	1127,10	456,20
3RK2-K	398,00	142,59	43,77	1131,05	455,34
3RK3-K	398,00	143,48	43,31	1094,20	442,42
4RK1-K	394,00	142,68	43,75	1091,05	443,62
4RK2-K	397,00	143,68	43,39	1102,10	445,29
4RK3-K	396,00	143,79	43,58	1099,65	443,14
			Keskmine	1113,22	448,18

Tabel L10.3. Ristiplaati lõigatud kruvikinnituse katsetulemused

Katsekeha nr	Maksimaalne koormus [kN]	Aeg [s]	Tihedus
1PK1	1,77	556,70	345,89
1PK2	1,59	534,80	392,88
1PK3	1,86	561,00	379,62
2PK1	1,72	545,10	346,08
2PK2	1,87	571,10	363,81
2PK3	1,74	548,00	367,73
3PK1	2,13	612,50	402,20
3PK2	2,06	604,00	358,32
3PK3	2,00	588,90	378,13
4PK1	1,47	499,80	360,29
4PK2	1,52	513,10	355,21
4PK3	1,53	514,40	379,89
Keskmine	1,77	554,12	369,17

Tabel L10.4. Pikiplaati lõigatud kruvikinnituse katsetulemused

Katsekeha nr	Maksimaalne koormus [kN]	Aeg [s]	Tihedus
1RK1	2,23	623,30	392,15
1RK2	2,35	642,60	395,86
1RK3	2,40	649,90	394,45
2RK1	2,30	642,00	390,45
2RK2	2,15	617,7	396,21
2RK3	2,45	644,00	435,00
3RK1	2,05	595,50	362,99
3RK2	2,31	633,80	383,99
3RK3	2,46	658,60	404,71
4RK1	1,77	544,90	387,11
4RK2	1,61	529,60	353,10
4RK3	2,63	684,00	432,86
Keskmine	2,23	622,56	394,07



Joonis L10.1. Piki plaati katsekeha 1RK1.



Joonis L10.2. Piki plaati katsekeha 1RK2.



Joonis L10.3. Piki plaati katsekeha 1RK3.



Joonis L10.4. Piki plaati katsekeha 2RK1.



Joonis L10.5. Piki plaati katsekeha 2RK2.



Joonis L10.6. Piki plaati katsekeha 2RK3.



Joonis L10.7. Piki plaati katsekeha 3RK1.



Joonis L10.8. Piki plaati katsekeha 3RK2.



Joonis L10.9. Piki plaati katsekeha 3RK3.



Joonis L10.10. Piki plaati katsekeha 4RK1.



Joonis L10.11. Piki plaati katsekeha 4RK2.



Joonis L10.12. Piki plaati katsekeha 4RK3.



Joonis L10.13. Risti plaati katsekeha 1PK1.



Joonis L10.14. Risti plaati katsekeha 1PK2.



Joonis L10.15. Risti plaati katsekeha 1PK3.



Joonis L10.16. Risti plaati katsekeha 2PK1.



Joonis L10.17. Risti plaati katsekeha 2PK2.



Joonis L10.18. Risti plaati katsekeha 2PK3.



Joonis L10.19. Risti plaati katsekeha 3PK1.



Joonis L10.20. Risti plaati katsekeha 3PK2.



Joonis L10.21. Risti plaati katsekeha 3PK3.



Joonis L10.22. Risti plaati katsekeha 4PK1.



Joonis L10.23. Risti plaati katsekeha 4PK2.



Joonis L10.24. Risti plaati katsekeha 4PK3.

Lisa 11. Soojusjuhtivuse katsete graafikud 58 mm põhuplaadi katsekeha mõõtmiste kohta

Tabel L11.1. Soojuserijuhtivuse katsekehade katsete läbiviimise aeg, kaal, veesisaldus

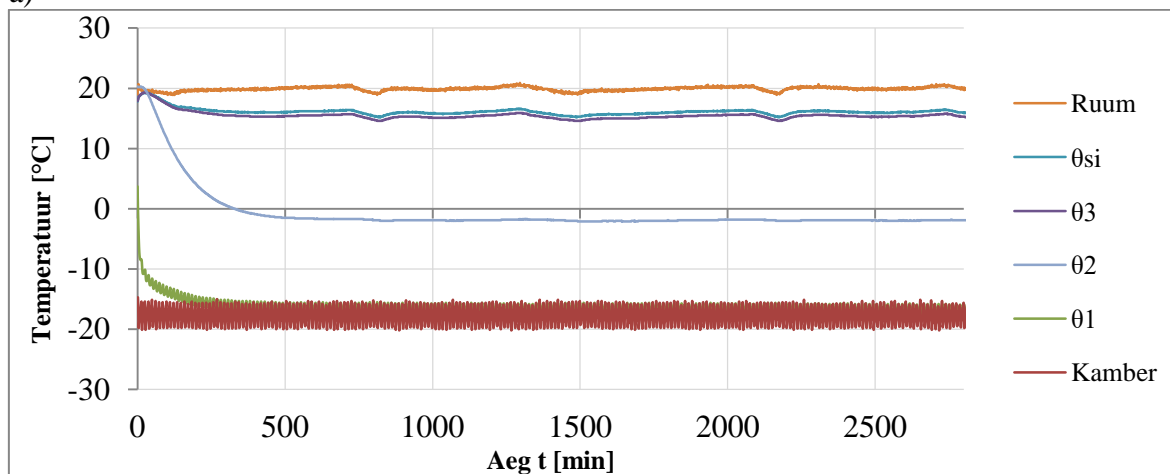
Nr.	Tähis	Katsekeha mõõdud	Kliimakambris mõõtmine		Katsekehade mass			Vee- sisaldus
					Kliimakamber	Kuivatuskapp		
			algus	lõpp	m _n [g]	m _k [g]	t [°C]	W _k [%]
1.	PP-1	295 x 295 x 58 mm	3.04.19 19:33:36	4.04.19 18:28:15	1986,60	1822,83	105	8,98
2.	PP-2	295 x 295 x 58 mm	5.04.19 18:39:10	8.04.19 19:39:48	2151,40	1974,51	105	8,96
3.	PP-3	295 x 295 x 58 mm	8.04.19 20:37:52	10.04.19 18:12:52	2036,28	1864,69	105	9,20
4.	PP-4	295 x 295 x 58 mm	10.04.19 18:25:06	11.04.19 17:08:16	1689,68	1567,12	105	7,82
5.	PP-5	295 x 295 x 58 mm	11.04.19 17:20:12	15.04.19 11:44:31	1913,55	1766,57	105	8,32

Tabel L10.2. Soojuserijuhtivuse katsekehade ruumala, tihedus, temperatuur (vaata koos joonisega 55 ja valemiga 5.5)

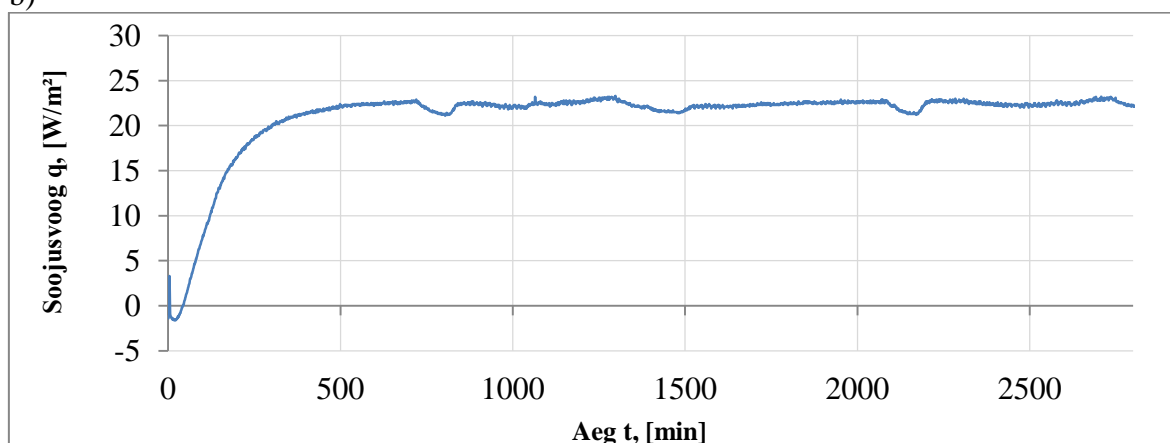
Nr.	Tähis	Katsekeha mõõdud	Ruumala	Tihedus	Keskmine tihedus	Stabiilse lõigu keskmised temperatuurid			Standarthälve
			V	ρ	ρ	Θ välispind	Θ sisepind	Θ keskmise	S _λ
			m ³	kg/m ³	kg/m ³	Θ ₁ [°C]	Θ ₂ [°C]	T ₁ [°C]	
1.	PP-1	295 x 295 x 58 mm	0,00505	393,6	387,4	-16,6	-1,9	7,3	0,116
2.	PP-2	295 x 295 x 58 mm	0,00505	426,2		-14,0	-1,9	6,1	
3.	PP-3	295 x 295 x 58 mm	0,00505	403,4		-14,0	-0,8	6,6	
4.	PP-4	295 x 295 x 58 mm	0,00505	334,8		-14,1	0,6	7,4	
5.	PP-5	295 x 295 x 58 mm	0,00505	379,1		-13,9	-0,8	6,5	

Termopaaride asetus katsekeha soojuseriituvuse mõõtmisel on välja toodud Joonisel 62.

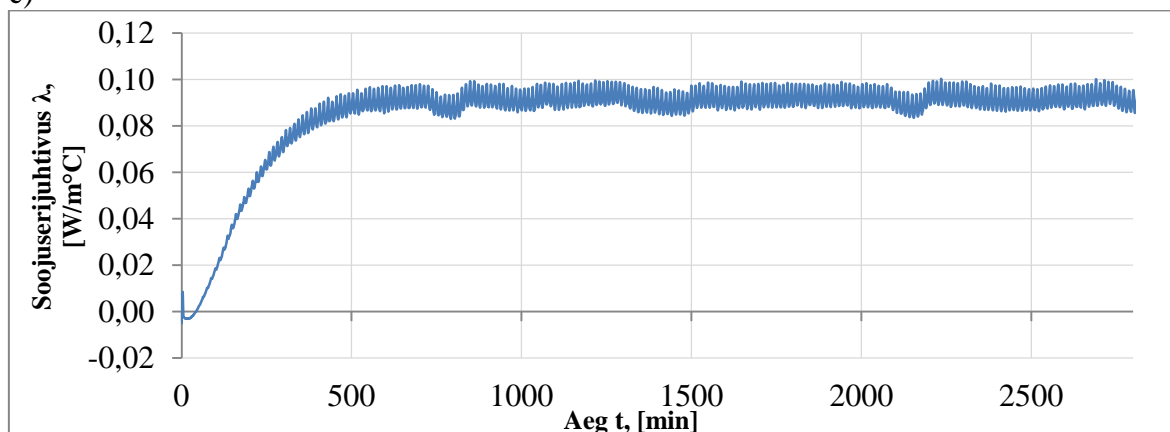
a)



b)

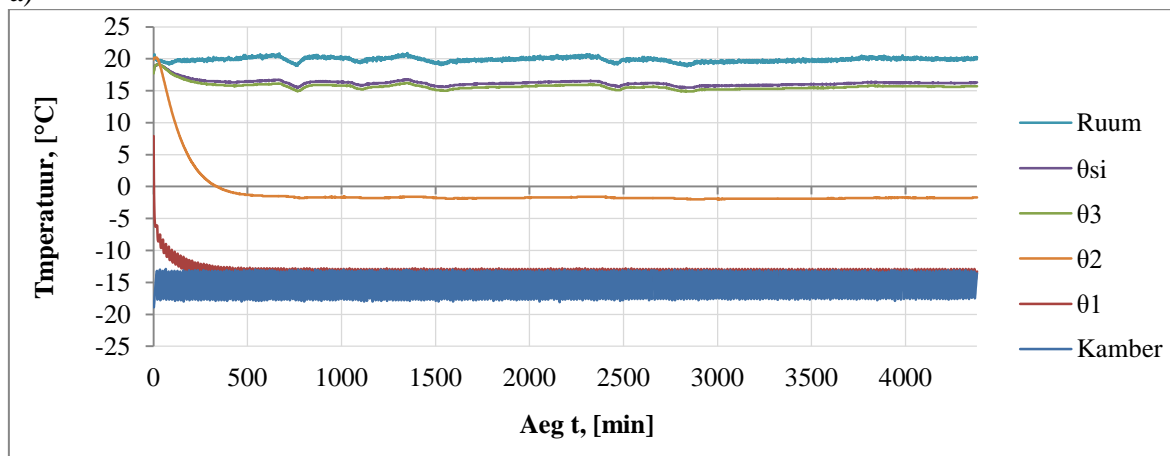


c)

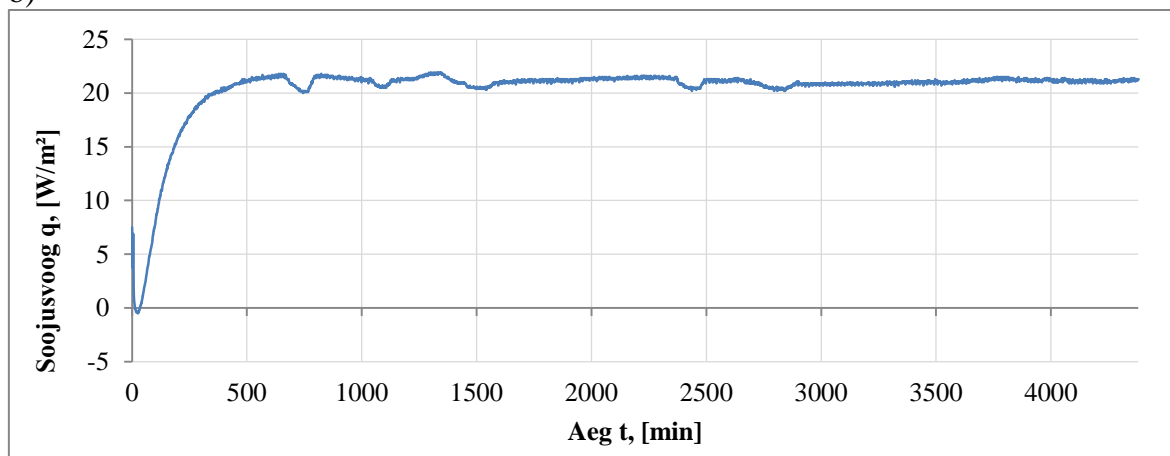


Joonis L11.1. Põhuplaadi katsekeha PP-1 a) temperatuuri muutus ajas; b) soojusvoo muutus ajas; soojuseriituvuse muutus ajas

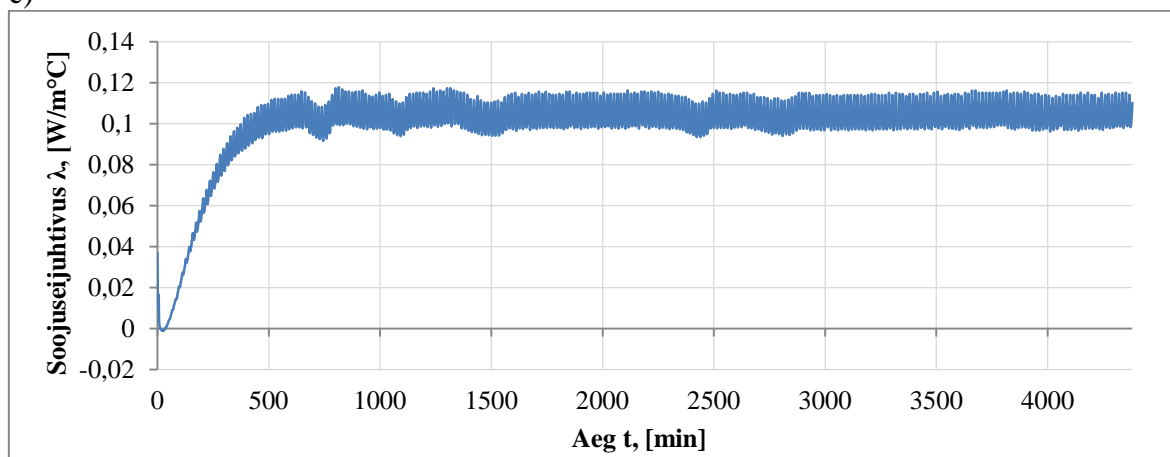
a)



b)

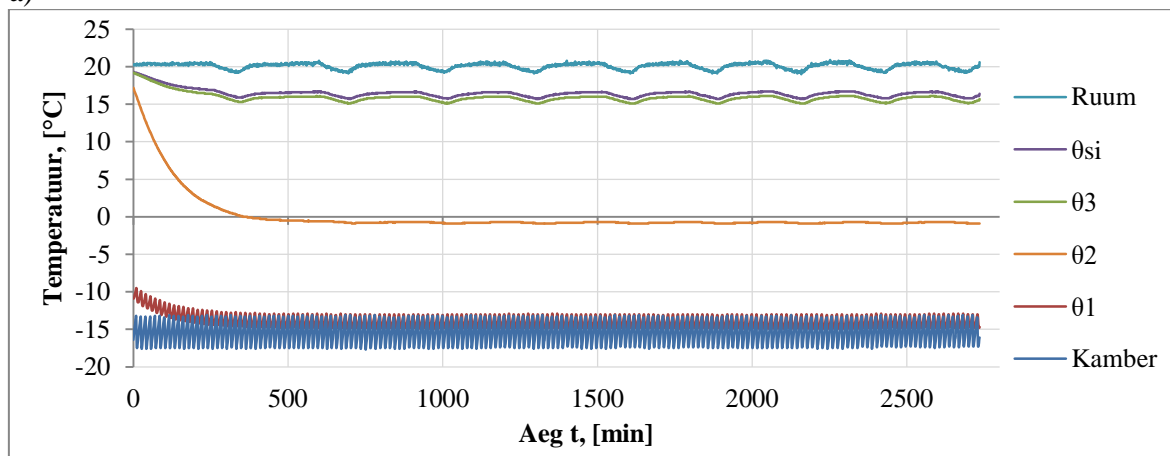


c)

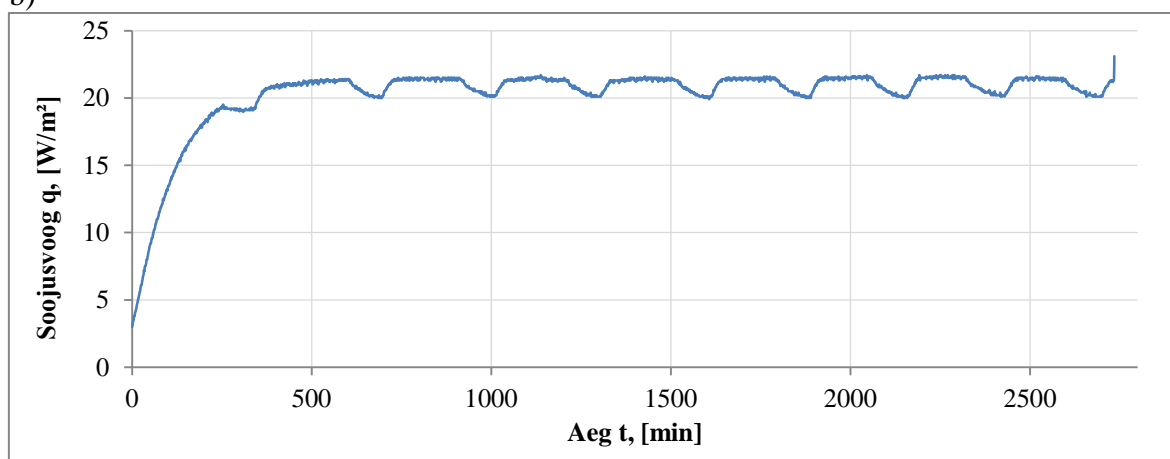


Joonis L11.2. Põhuplaadi katsekeha PP-2 a) temperatuuri muutus ajas; b) soojusvoo muutus ajas; soojuseri juhtivuse muutus ajas

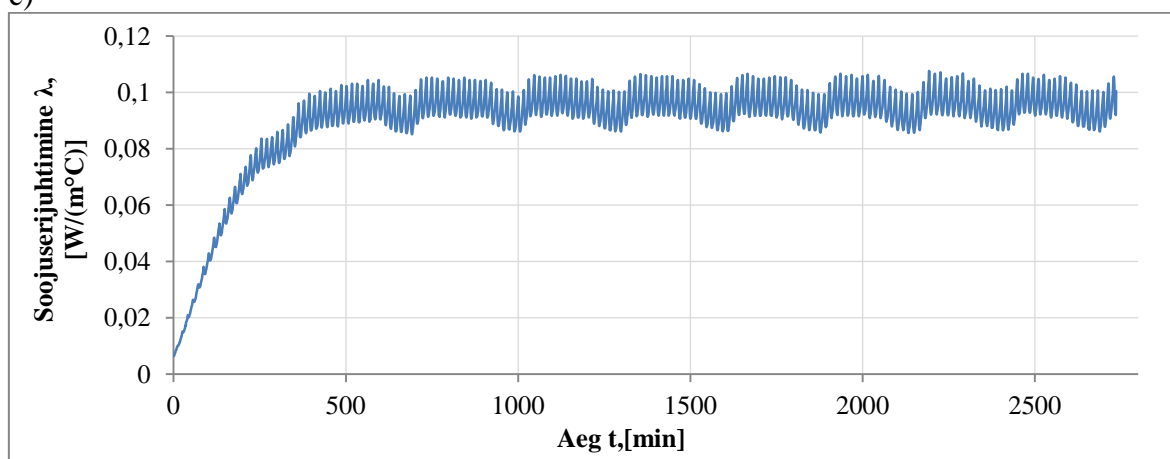
a)



b)

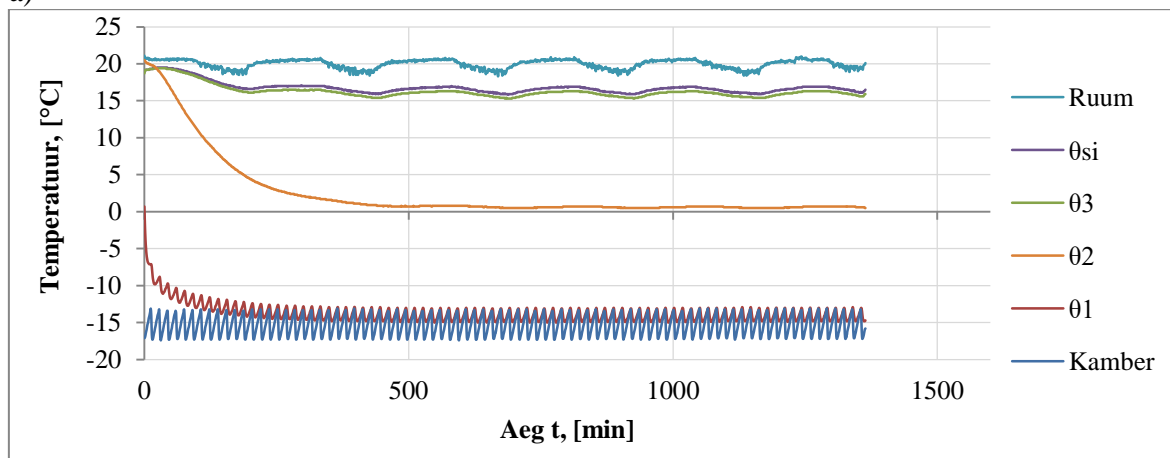


c)

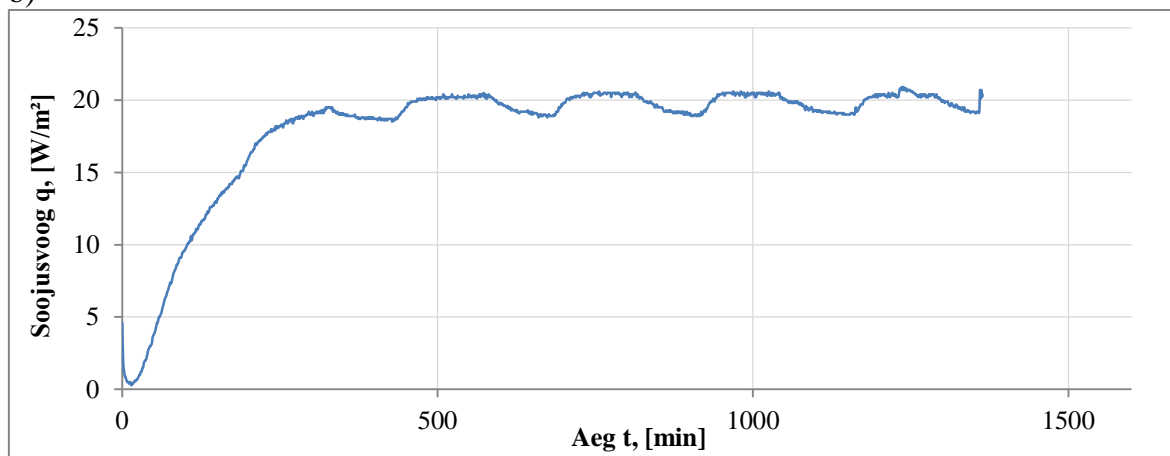


Joonis L11.3. Põhuplaadi katsekeha PP-3 a) temperatuuri muutus ajas; b) soojusvoo muutus ajas; soojuseri juhtivuse muutus ajas

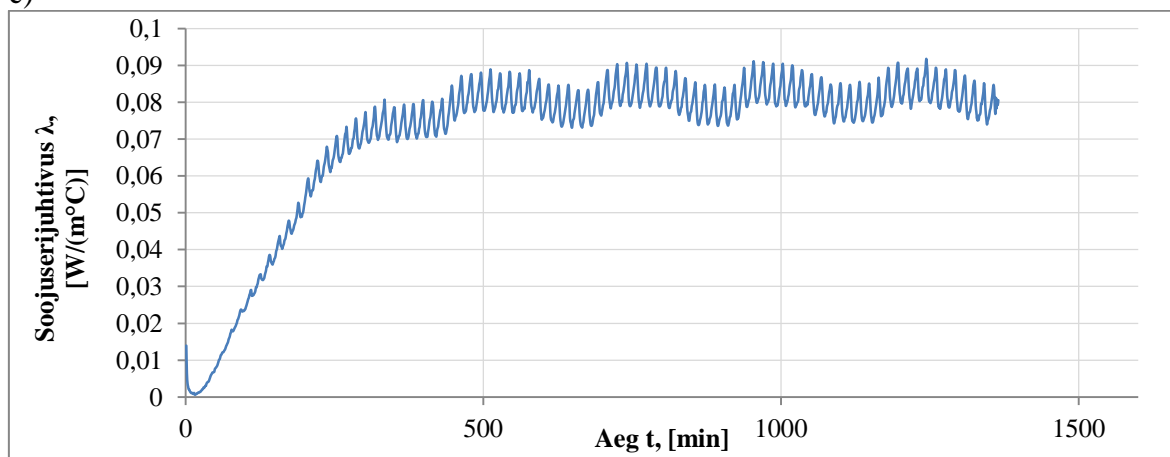
a)



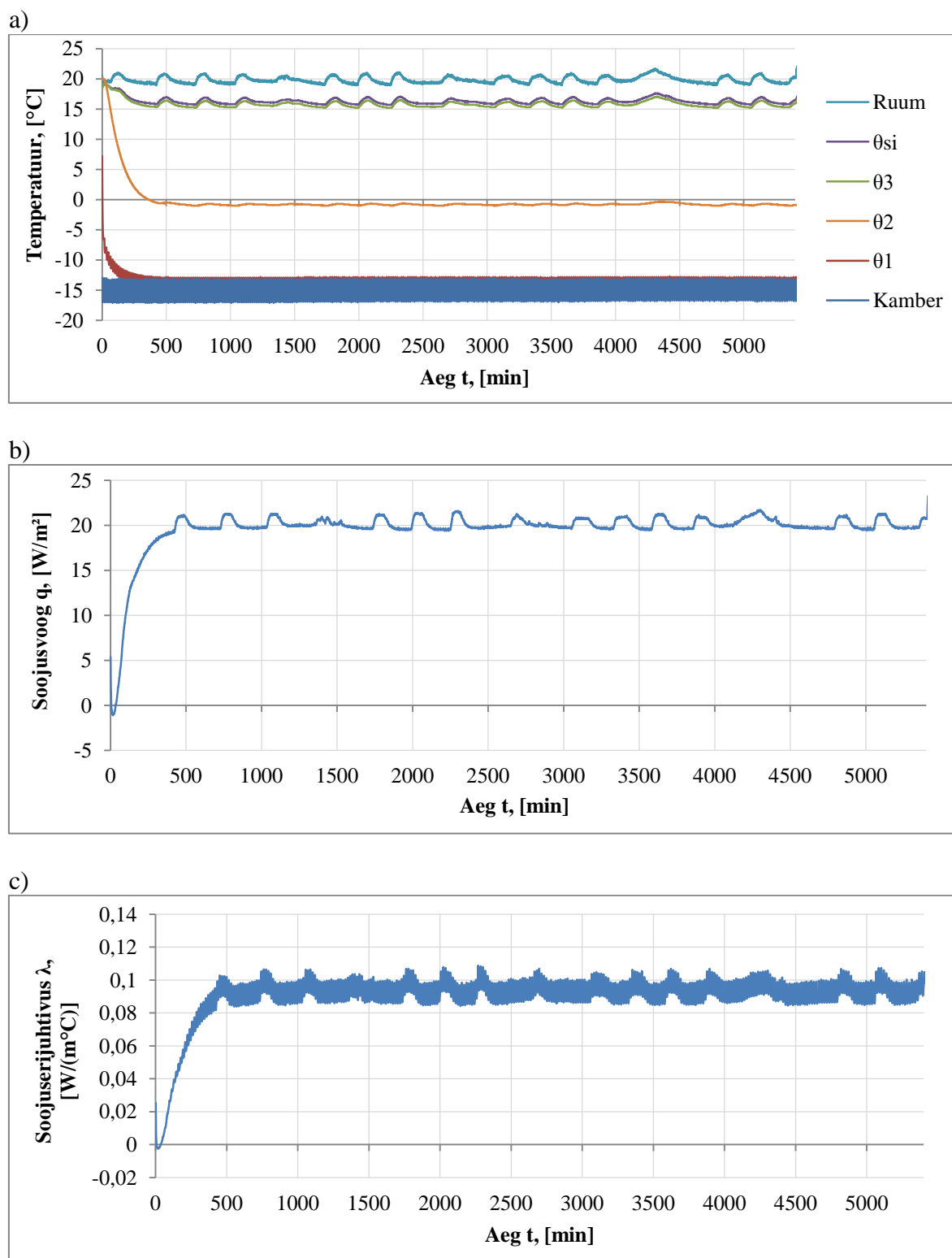
b)



c)



Joonis L11.4. Põhuplaadi katsekeha PP-4 a) temperatuuri muutus ajas; b) soojusvoo muutus ajas; soojuserihtivuse muutus ajas



Joonis L11.5. Põhuplaadi katsekeha PP-5 a) temperatuuri muutus ajas; b) soojusvoo muutus ajas; soojuserihtivuse muutus ajas

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja/või üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Allan Antsmäe

(isikukood 37509054219)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Ekopanely põhuplaatide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste uurimine, mille juhendajad on Marti-Jaan Miljan ja Vello Pallav,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartus, 03.06.2019

Olen koostanud töö iseseisvalt. Kõik töös kasutatud teiste autorite tööd ning andmeallikad on viidatud.

.....
kuupäev / nimi / allkiri

Juhendajad:

.....
kuupäev / nimi / allkiri

.....
kuupäev / nimi / allkiri